

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL
SISTEMA ESTRUCTURAL DEL AUTOBÚS FELINE PARA LA
EMPRESA CARROCERA MIRAL BUSES.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

JORGE LUIS CEPEDA MIRANDA

DIRECTOR: ING. FERNANDO OLMEDO S.

CODIRECTOR: ING. JOSÉ PÉREZ R.

ABRIL, 2006

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL DEL AUTOBÚS FELINE PARA LA EMPRESA CARROCERA MIRAL BUSES” fue realizado en su totalidad por JORGE LUIS CEPEDA MIRANDA, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Fernando Olmedo
DIRECTOR

Ing. José Pérez
CODIRECTOR

Sangolquí, 2006-04-07

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL DEL AUTOBÚS FELINE PARA LA EMPRESA CARROCERA MIRAL BUSES”

ELABORADO POR:

Jorge Luis Cepeda Miranda

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**MYR. C.S.M. Ing. Edgar Pazmiño
DECANO**

Sangolquí, 2006-04-12

DEDICATORIA

Soñar significa anhelar, luchar, sufrir...

¿Puede alguien mirar una estrella sin desear tocarla?

¿Puede alguien sentir su calor sin querer quemar su alma?

¿Puede alguien saborear su aroma y dejar de sentir su dulce veneno?

¿Puede alguien luchar contra el cielo que la esconde?

¿Quiere alguien darse cuenta que al final

El cielo derramó sangre y hiel...

Y la propia luna exhaló su último aliento...

Y que su estrella abrió sus brazos y lo consumió con su luz?

...en sus sueños...

Porque soñar es luchar... es entregar el ser por el querer...es buscar el infinito...

Luchar es soportar el son de la amargura para entonar las notas de la victoria...

Luchar es sentir el peso pena para encontrar la fuerza de la voluntad...

Luchar es sentir el infierno, la tierra, el cielo...Luchar es sentir morir para vivir...

Luchar es mirar atrás y encontrar que existe alguien por quien ha valido la pena morir, alguien a quien entregar el fruto divino de la búsqueda, alguien quien ve los sueños desde muy adentro y desde muy afuera, alguien que estuvo ahí antes del ayer y estará cuando pase el mañana, cuando el mundo se haya ido, cuando la tristeza se haya ido...

Porque son esos seres maravillosos quienes arrojaron la primera piedra contra el mundo, quienes me dan las armas y quienes día a día me enseñan que vivir es soñar y luchar... Esos seres maravillosos son mi Dios, mi madre, mi padre, mi hermana...para ellos mi vida entera.

AGRADECIMIENTO

A la vida, por matizar, sus dulces y amargas esencias,

A los amigos de aquí, de allá, por combinar lo bueno y lo malo en lo auténtico,

A la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica del Ejército, por contrastar en colores fuertes las innumerables experiencias de vida, por sus maestros que supieron inculcar el amor por la Ingeniería Mecánica, por sus estudiantes que supieron demostrar el amor por la vida,

A Miral Buses, en las personas de su Gerente General Ing. José Miranda por su colaboración, Ing. Cesar Arroba por su muy valiosa ayuda y asesoramiento, y muy especialmente su Gerente Financiero Lcda. Graciela Miranda porque es para mí su presencia la fuente infinita de cariño, convicción, motivación y sapiencia y porque es imposible la realización de un sueño sin apoyo incondicional, sin empuje moral, sin un ejemplo de entrega y sin las ganas de esforzarse por ser hoy mejor que ayer...

A mi padre por su infinita confianza, por su infinita comprensión, por su infinito aliento,

A mi hermana, porque su sola presencia hace mi mundo feliz, su amistad, llevadero y su sonrisa, hermoso,

Al destino, por entroncar sus senderos en esta tierra, en este instante.

*La ingeniería mecánica no se mide de la creatividad
a la genialidad sino de la pasión al infinito* **ABREVIATURAS**

EMSAT:	Empresa Metropolitana de Servicios y Administración del Transporte.
INEN:	Instituto Ecuatoriano de Normalización.
CEE:	Comunidad Económica Europea
UNECE:	Naciones Unidas, Comisión Económica Europea (United Nations – Economic Commission for Europe)
MEF:	Metodo de elementos finitos.
FEM:	Metodo de elementos finitos (Finite element method)
FMVSS:	American Federal Motor Vehicle Safety Standard
GMAW :	Soldadura por Arco de Metal y Gas (Gas Metal Arc Welding)
LRFD:	Diseño por Factor de Carga y Resistencia (Load and Resistance Factor Design)
SC:	Situación de carga
HSS:	Secciones Estructurales Tubulares (Hollow Structural Sections)
LRFD HSS:	Diseño por Factor de Carga y Resistencia para Secciones Estructurales Tubulares de Acero (Load and Resistance Factor Design Specification for Steel Hollow Structural Sections)
AISC:	Instituto Americano de la Construcción de Acero (American Institute of Steel Construction)
LTB:	Pandeo lateral torsional (Lateral Torsional Buckling)
FMVSS:	Estándares Federales para la seguridad de vehículos a motor (Federal Motor Vehicle Safety Standards)

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO ii

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

iii

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
RESUMEN	

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1	Introducción	1
1.2	Antecedentes	2
1.2.1	Necesidad insatisfecha	3
1.2.2	Requerimientos	3
1.3	Objetivo General	4
1.4	Objetivos específicos	4
1.5	Justificación	5
1.6	Alcance	7

CAPÍTULO 2. SUSTENTO TEÓRICO

2.1	CARROCERÍAS METÁLICAS	9
2.1.1	Vehículos de transporte de pasajeros	9
2.1.1.1	Categorización de los vehículos de transporte	9
2.1.1.2	Clasificación de los vehículos de transporte de pasajeros	11
2.1.2	Aspectos fundamentales concernientes a las unidades de transporte de pasajeros	14
2.1.2.1	Componentes estructurales principales de una unidad de transporte de pasajeros	15
2.1.3	El bastidor del chasis	16

2.1.3.1	Diseño del bastidor	17
2.1.3.2	Aspectos fundamentales en la rigidez del chasis	18
2.1.3.3	Tipos de bastidores	19
2.1.3.4	Materiales del bastidor	20
2.1.4	La carrocería	21
2.1.4.1	Partes de la carrocería	21
2.1.4.2	Diseño de la carrocería	23
2.1.4.3	Principios de diseño de la estructura	27
2.1.4.4	Relación entre las características de la carrocería del bus y el desempeño del vehículo	28
2.1.4.5	Tipos de carrocerías	30
2.1.4.5.1	Clasificación y de las carrocerías de bus, por su estructura	30
2.1.4.6	Partes de la estructura de esqueleto de refuerzo	34
2.1.4.7	Estudio de las fuerzas que actúan sobre la carrocería	36
2.1.4.7.1	Cargas de flexión	36
2.1.4.7.2	Cargas torsionales	37
2.1.4.7.3	Cargas laterales	38
2.1.4.7.4	Cargas de frenado	39
2.1.4.7.5	Fuerzas verticales	40
2.1.4.7.6	Fuerzas longitudinales	42
2.1.4.7.7	Fuerzas transversales	43
2.1.4.8	Distribución de carga sobre los componentes de la carrocería	44
2.1.4.9	Disposición de los miembros en la estructura	51
2.1.4.10	Estructura del piso	53
2.1.4.11	Estructuras del lado derecho e izquierdo	54
2.1.4.12	Estructura frontal	57
2.1.4.13	Estructura posterior	58
2.1.4.14	Estructura del techo	59
2.2	NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES	60
2.2.1	Normas internacionales	

2.2.1.1	Normativas internacionales que afectan unidades de transporte de pasajeros	60
2.2.1.2	Requerimientos del Motor Vehicle Safety Standard 220 (Transporte Escolar)	61
2.2.1.3	Requerimientos del Reglamento 36	61
2.2.1.4	Requerimientos Reglamento 66	62
2.2.2	Normas nacionales	62
2.2.2.1	Aspectos generales relativos a las normativas ecuatorianas	63
2.2.2.2	La carrocería	63
2.3	PAQUETES COMPUTACIONALES ESPECIALIZADOS FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS	64
2.3.1	Necesidad del modelo físico – matemático	64
2.3.2	Métodos de análisis de problemas elásticos en sistemas estructurales	65
2.3.3	Fundamentos del análisis estructural Mediante el método de elementos finitos (mef)	65
2.3.3.1	Conceptos fundamentales	66
2.3.4	Etapas en la solución de un problema mediante el MEF	71
2.3.4.1	Discretización de la estructura en elementos finitos	73
2.3.4.2	Evaluación de las matrices elementales	73
2.3.4.3	Ensamblaje de la matriz global del sistema estructural	74
2.3.4.3.1	Forma de la ecuación fundamental de análisis de sistemas estructurales	75
2.3.4.4	Aplicación de las condiciones de borde y cargas externas	76
2.3.4.5	Cálculo de las fuerzas Internas en los elementos	77
2.3.5	Paquetes de análisis estructural especializados	78

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE MODELADO, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL

3.1	ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE SOFTWARE	81
3.1.1	Criterios de selección de software	81
3.1.2	Análisis de opciones factibles y selección de aplicación conveniente.	82
3.2	MODELADO DE LA ESTRUCTURA.	84
3.2.1	Antecedentes.	84
3.2.2	Conceptos.	85
3.2.3	Esquematización general de la metodología de modelado.	88
3.2.4	Condiciones generales para el modelado de estructuras.	90
3.2.5	Generación de la geometría de la estructura.	91
3.2.6	Asignación de propiedades geométricas a miembros particulares constitutivos de la estructura.	92
3.2.7	Asignación de propiedades de materiales constitutivos a miembros de la estructura.	93
3.2.8	Generación del modelo de elementos finitos.	93
3.2.9	Determinación de las condiciones iniciales del modelo.	93
3.2.10	Establecimiento y simulación de cargas actuantes.	94
3.3	SIMULACIÓN DE ESTADOS DE CARGA.	94
3.3.1	Casos de carga en análisis.	95
3.3.2	Simulación de cargas.	95
3.3.2.1	Cargas constantes.	96
3.3.2.2	Cargas debidas a los viajeros.	97
3.3.2.3	Cargas dinámicas.	98
3.3.2.3.1	Introducción.	98
3.3.2.3.2	Definiciones.	99

3.3.2.3.3	Análisis matemático. Estudio teórico.	99
3.3.2.3.4	Modelo matemático.	102
3.3.2.3.5	Comportamiento del sistema.	104
3.3.2.3.6	Investigaciones en sistemas reales. Estudios experimentales.	108
3.3.2.3.7	Cuantificación de las cargas dinámicas para la simulación. Lineamientos de análisis del proyecto.	109
3.3.2.4	Carga de resistencia del viento.	110
3.3.2.4.1	Coefficiente de resistencia aerodinámica al avance para vehículos y autobuses.	111
3.3.2.4.2	Densidad del aire	112
3.3.2.4.3	Velocidad y área proyectada.	113
3.3.2.4.4	Diagrama de incidencia de cargas de resistencia de viento.	113
3.3.2.5	Carga de frenado violento.	114
3.3.2.5.1	Distancia de detención. Tiempo de reacción. Tiempo de detención.	114
3.3.2.5.2	Fuerza retardadora máxima.	115
3.3.2.5.3	Análisis de condiciones reales.	115
3.3.2.5.4	Diagrama de incidencia de carga de frenado.	118
3.3.2.6	Carga de aceleración violenta.	118
3.3.2.6.1	Análisis	119
3.3.2.6.2	Diagrama de incidencia de cargas de aceleración.	121
3.3.2.7	Cargas de giro.	121
3.3.2.7.1	Diagrama de incidencia de cargas de giro.	122
3.3.3	Estudio de casos de carga. Situaciones de carga	123
3.3.3.1	Marcha en aceleración lineal por vías en estado aceptable (SC1)	126
3.3.3.1.1	Consideraciones	126
3.3.3.1.2	Cargas actuantes.	126
3.3.3.1.3	Tratamiento y magnitud de las cargas.	126
3.3.3.2	Marcha en aceleración lineal por vías en mal	

	estado (SC2).	127
3.3.3.2.1	Consideraciones	127
3.3.3.2.2	Cargas actuantes.	127
3.3.3.2.3	Tratamiento y magnitud de las cargas.	127
3.3.3.3	Marcha a velocidad constante en curva amplia (SC3).	128
3.3.3.3.1	Consideraciones	128
3.3.3.3.2	Cargas actuantes.	128
3.3.3.3.3	Tratamiento y magnitud de las cargas.	128
3.3.3.4	Marcha en curva estrecha (cambio de carril) (SC4).	129
3.3.3.5	Marcha en curva amplia en mal estado (SC5).	130
3.3.3.6	Frenado en línea recta en vía en mal estado (SC6).	131
3.3.3.7	Frenado en curva amplia (SC7).	132
3.3.3.8	Frenado en curva estrecha (cambio de carril) (SC8).	133
3.3.3.9	Frenado en curva rápida en mal estado (SC9).	134
3.3.3.10	Análisis del combamiento de la estructura con una rueda sin tocar el piso (SC10).	135
3.3.4	Proceso de simulación.	136
3.4	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MODELADO, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL.	137
3.4.1	Especificaciones generales del chasis para la unidad de transporte Feline.	137
3.4.2	Especificaciones y descripción general de la carrocería y estructura de la unidad de transporte Feline.	139
3.4.2.1	Capacidad y dimensiones generales.	140
3.4.2.2	Especificaciones de perfiles.	140
3.4.2.3	Especificaciones de materiales.	143
3.4.2.4	Especificaciones de soldadura.	144
3.4.3	Generación de la geometría completa de la estructura.	144
3.4.3.1	Condiciones particulares para el modelado de la estructura de la unidad Feline de Miral.	145
3.4.3.2	Esquematización bidimensional en AutoCAD 2006	145

3.4.3.3	Modelado tridimensional con AutoCAD 2006.	146
3.4.4	Asignación de propiedades de materiales constitutivos de miembros de la estructura. Análisis global de la estructura	151
3.4.5	Asignación de propiedades geométricas a miembros particulares constitutivos de la estructura en SAP2000	152
3.4.6	Determinación de las condiciones iniciales y de borde del modelo	158
3.4.7	Establecimiento y simulación de cargas actuantes	159
3.4.7.1	Cargas constantes.	159
3.4.7.2	Cargas viajeros.	162
3.4.7.3	Cargas dinámicas.	163
3.4.7.4	Carga de resistencia del viento.	163
3.4.7.5	Cálculo del centro de gravedad total.	164
3.4.7.6	Carga de frenado violento.	166
3.4.7.7	Carga de aceleración violenta.	168
3.4.7.8	Carga de giro.	169
3.4.7.8.1	Carga de giro en curvas amplias	169
3.4.7.8.2	Carga de giro en curvas estrechas	171
3.4.7.9	Aplicación de cargas.	172
3.4.8	Simulación.	174

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1	ZONAS CRÍTICAS	177
4.1.1	Generalidades y lineamientos	177
4.1.2	Determinación de densidad de carga en la estructura.	177
4.1.3	Determinación de situación crítica de carga.	178
4.1.3.1	Análisis Situación de Carga 1 (SC1).	180
4.1.3.2	Análisis Situación de Carga 2 (SC2).	181
4.1.3.3	Análisis Situación de Carga 3 (SC3).	182

4.1.3.4	Análisis Situación de Carga 4 (SC4).	183
4.1.3.5	Análisis Situación de Carga 5 (SC5).	184
4.1.3.6	Análisis Situación de Carga 6 (SC6).	185
4.1.3.7	Análisis Situación de Carga 7 (SC7).	186
4.1.3.8	Análisis Situación de Carga 8 (SC8).	187
4.1.3.9	Análisis Situación de Carga 9 (SC9).	188
4.1.3.10	Análisis Situación de Carga a torsión 10 (SC10).	189
4.1.3.11	Selección de situaciones de carga crítica.	190
4.1.3.12	Comportamiento general de la estructura ante la acción de la situación de carga crítica	190
4.1.3.12.1	Análisis del comportamiento general de la estructura ante la acción de la situación de carga crítica	194
4.1.3.13	Análisis de carga sobre los ejes	195
4.1.4	Especificación de zonas críticas.	195
4.1.5	Análisis de zonas críticas.	196
4.1.5.1	Zona de transición entre cajuela posterior y piso.	196
4.1.5.1.1	Análisis detallado.	197
4.1.5.1.2	Consideraciones de análisis.	198
4.1.5.1.3	Análisis en CosmosWorks 2006.	199
4.1.5.2	Zonas de anclajes y estabilizadores cercanos a los ejes.	200
4.1.5.3	Zonas de estructuras laterales cercanas a las aberturas para los neumáticos y puerta de ingreso.	202
4.1.5.4	Zona inferior de la estructura del respaldo	203
4.2	MIEMBROS SOMETIDOS A ESFUERZOS EXCESIVOS.	203
4.2.1	Miembros estructurales.	203
4.2.1.1	Elemento 228	204
4.2.1.1.1	Ubicación	204
4.2.1.1.2	Cargas y especificaciones.	205
4.2.1.1.3	Análisis de resistencia a compresión.	208
4.2.1.1.4	Análisis de pandeo lateral.	210
4.2.1.1.5	Análisis de resistencia a flexión.	212

4.2.1.1.6	Análisis de resistencia a fuerzas cortantes	213
4.2.1.1.7	Análisis de resistencia a torsión.	214
4.2.1.1.8	Análisis de resistencia a torsión global de la estructura.	216
4.2.1.1.9	Análisis de resistencia a esfuerzos combinados (flexión, fuerza axial).	217
4.2.1.1.10	Análisis de resistencia a esfuerzos cortantes combinados (torque, fuerza cortante).	218
4.2.1.1.12	Análisis de esfuerzos combinados globales.	219
4.2.1.1.13	Análisis de resistencia a fatiga del elemento.	220
4.2.1.1.14	Análisis de resistencia a fatiga global de la estructura.	223
4.2.1.2	Elementos 449 y 1298	225
4.2.1.3	Elemento 1727	226
4.2.1.4	Elemento 211	226
4.2.1.5	Elemento 1414	227
4.2.2	Elementos de conexión.	232
4.2.2.1	Angulo de anclaje (zona de transición cajuela-piso).	232.
4.2.2.2	Junta lateral sobre abertura para neumático derecho.	234
4.2.2.3	Pernos de anclaje al chasis.	237
4.3	ZONAS SOBREDIMENSIONADAS.	238
4.4	MIEMBROS SUBUTILIZADOS.	240

CAPÍTULO 5. REDISEÑO

5.1	MODIFICACIÓN DE GEOMETRÍA DE ZONAS CRÍTICAS	241
5.1.1	Introducción.	241
5.1.2	Propuesta de rediseño.	241
5.1.2.1	Piso y anclajes	242
5.1.2.2	Laterales	242
5.1.2.3	Frente	242
5.1.2.4	Respaldo	243

5.1.2.5	Techo	243
5.1.2.6	Cajuelas	243
5.1.3	Zonas críticas susceptibles de modificación.	243
5.1.4	Estructuras laterales. Zonas de albergue de los neumáticos.	244
5.1.5	Estructuras laterales. Zonas anterior y posterior a la puerta de ingreso.	245
5.1.6	Respaldo. Zonas de anclaje lateral e intermedio de la estructura lateral al respaldo.	245
5.1.7	Respaldo. Zonas central de soporte de fibra de vidrio posterior.	246
5.2	CAMBIO DE PROPIEDADES DE MIEMBROS SOBRE – ESFORZADOS	247
5.3	MODIFICACIÓN DE GEOMETRÍA DE ZONAS SOBREDIMENSIONADAS	247
5.3.1	Zona de cajuelas para reducción del número de apoyos estructurales de Sujeción al chasis.	248
5.3.2	Eliminación del arco de refuerzo del techo que sobre la cajuela	249
5.4	CAMBIO DE PROPIEDADES DE MIEMBROS SUB – ESFORZADOS	250
5.5	COMPROBACIONES DE DISEÑO	251
5.5.1	Comprobación de resistencia respecto a esfuerzos aplicados.	251
5.5.2	Comprobación de resistencia respecto a torques aplicados.	253
5.5.3	Comprobación de resistencia a fatiga.	253
5.5.4	Comprobación del peso de la estructura.	253
5.5.5	Comprobación de densidad de carga.	253
5.5.6	Comprobación de carga sobre los ejes.	254

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES	257
6.2 RECOMENDACIONES	261

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO A. UNIONES ENTRE ELEMENTOS ESTRUCTURALES	265
ANEXO B. ESTUDIO DEL ÁREA EFECTIVA DE CORTE	298
ANEXO C. COMPROBACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LA ESTRUCTURA DE LA UNIDAD DE TRANSPORTE FELINE BAJO PARÁMETROS DE NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES	305
ANEXO D. GLOSARIO DE TÉRMINOS.	325
ANEXO E. ANÁLISIS ECONÓMICO – FINANCIERO.	331
ANEXO F. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES Y SOLDADURA.	335
ANEXO G. CARTA DE SATISFACCIÓN DE MIRAL BUSES.	341
ANEXO H. NORMAS REFERENTES A LA CONSTRUCCION DE AUTOBUSES PARA EL TRANSPORTE DE PASAJEROS	
ANEXO I. TABLAS DE RESULTADOS DE ANALISIS	

ESTRUCTURALES

ANEXO J. PLANOS

LISTADO DE FIGURAS

Fig. 2.1 Vehículo de categoría M1.	10
Fig. 2.2 Vehículo de categoría M2.	10
Fig. 2.3 Vehículo de categoría M3.	10
Fig. 2.4 Unidad de transporte de construcción simple.	11
Fig. 2.5 Unidad de transporte de construcción articulada.	12
Fig. 2.6 Microbús.	12
Fig. 2.7 Ómnibus.	12
Fig. 2.8 Unidad de transporte 6 x 2.	12
Fig. 2.9 Unidad de transporte 8 x 2.	13
Fig. 2.10 Unidad de transporte institucional.	13
Fig. 2.11 Unidad de transporte de turismo.	13
Fig. 2.12 Unidad de transporte urbano.	14
Fig. 2.13 Unidad de transporte interprovincial.	14
Fig. 2.14 Componentes de una unidad de transporte.	16
Fig. 2.15 Cargas actuantes en la deflexión del chasis.	18
Fig. 2.16 Cargas actuantes en la torsión del chasis.	19
Fig. 2.17 Chasis tipo "ladder" (escalera)	20
Fig. 2.18 Estructura de la carrocería.	22
Fig. 2.19 Paneles externos de la carrocería.	22
Fig. 2.20 Interior e instrumentación de carrocería.	23
Fig. 2.21 Ubicación del centro de gravedad	25

Fig. 2.22 Estructura de refuerzo de recubrimiento externo.	31
Fig. 2.23 Estructura de refuerzo de recubrimiento interno.	32
Fig. 2.24 Estructura de esqueleto de refuerzo.	33
Fig. 2.25 Estructuras laterales	34
Fig. 2.26 Estructura del piso	35
Fig. 2.27 Estructura del techo	35
Fig. 2.28 Estructuras posterior y frontal (respectivamente)	36
Fig. 2.29 Comportamiento de las cargas flexionantes.	37
Fig. 2.30 Comportamiento de las cargas torsionales.	38
Fig. 2.31 Comportamiento de las cargas laterales.	39
Fig. 2.32 Comportamiento de las cargas de frenado	39
Fig. 2.33 Fuerzas verticales en la parte posterior de la estructura	41
Fig. 2.34 Fuerzas verticales en la parte delantera de la estructura	41
Fig. 2.35 Fuerzas longitudinales	43
Fig. 2.36 Comportamiento del vehículo al tomar una curva	43
Fig. 2.37 Fuerzas transversales	44
Fig. 2.38 Distribución de la carga de flexión sobre los componentes de la carrocería	45
Fig. 2.39 Distribución de la carga de flexión sobre los componentes de la estructura.	46
Fig. 2.40 Distribución de la carga de flexión sobre los paneles de la estructura	47
Fig. 2.41 Distribución de la carga de torsión sobre los componentes de la carrocería	48
Fig. 2.42 Distribución de la carga de torsión sobre los componentes de la estructura.	49
Fig. 2.43 Distribución de la carga de torsión sobre los paneles de la estructura	50
Fig. 2.44 Disposición de los miembros verticales y horizontales en la estructura	51
Fig. 2.45 Detalle de la disposición de los miembros	

verticales y horizontales en la estructura	52
Fig. 2.46 Estructura de pórtico o arco	52
Fig. 2.47 Estructura del piso	53
Fig. 2.48 Carga torsional estructuras laterales.	55
Fig. 2.49 Estructura de armazón del lateral	55
Fig. 2.50 Refuerzo de pórticos mediante miembros diagonales	56
Fig. 2.51 Refuerzo aberturas en estructuras	57
Fig. 2.52 Estructura frontal	58
Fig. 2.53 Estructura posterior	59
Fig. 2.54 Estructura posterior	60
Fig. 2.55 Diagrama de flujo de los pasos requeridos para un programa de análisis estructural.	72
Fig. 2.56 Disposición y orientación de las fuerzas en un elemento de estructura	78
Fig. 3.1 Mapa del proceso de Análisis Estructural	86
Fig. 3.2 Modelado geométrico de la estructura de la carrocería de una unidad de transporte	87
Fig. 3.3 Mallado de la estructura de la carrocería de una unidad de transporte	88
Fig. 3.4 Metodología de modelado la estructura de la carrocería de una unidad de transporte	89
Fig. 3.5 Aplicación e incidencia de cargas vivas y muertas	98
Fig. 3.6 Esquema del sistema oscilatorio simplificado unidad de transporte.	101
Fig. 3.7 Esquema del sistema oscilatorio de un bus.	103
Fig. 3.8 Esquema del sistema oscilatorio inducido a las llantas de la unidad Feline de Miral.	106
Fig. 3.9 Movimiento de los neumáticos frente a las irregularidades de la vía introducidas para el estudio de la unidad	

Feline de Miral.	107
Fig. 3.10 Fuerza dinámica resultante sobre la estructura de la unidad Feline de Miral a consecuencia de las irregularidades de las vías en mal estado.	108
Fig. 3.11 Carga dinámica normalizada tomada respecto al peso total de la unidad Feline	110
Fig. 3.12 Incidencia de cargas de resistencia del viento	114
Fig. 3.13 Diagrama de cuerpo libre de unidad de transporte Feline en frenado	116
Fig. 3.14 Aplicación e incidencia de cargas de frenado	118
Fig. 3.15 Diagrama de cuerpo libre de unidad de transporte en aceleración	120
Fig. 3.16 Aplicación e incidencia de cargas de aceleración	121
Fig. 3.17 Aplicación e incidencia de cargas de giro rápido	123
Fig. 3.18 Situaciones de carga	125
Fig. 3.19 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC1	126
Fig. 3.20 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC2	127
Fig. 3.21 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC3	128
Fig. 3.22 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC4	129
Fig. 3.23 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC5	130
Fig. 3.24 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC6	131
Fig. 3.25 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC7	132
Fig. 3.26 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC8	133
Fig. 3.27 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC9	134
Fig. 3.28 Planos de la estructura de la carrocería Feline de Miral.	146
Fig. 3.29 Geometría de estructura lateral derecha	147
Fig. 3.30 Geometría de estructura del techo de la unidad	148
Fig. 3.31 Geometría de estructura del respaldo y de cajuela posterior de la unidad Feline de Miral	148
Fig. 3.32 Geometría de estructuras laterales y partes principales de la estructura de pórticos de soporte	

de la unidad	149
Fig. 3.33 Geometría de estructura frontal y ensamble de estructuras laterales con frontal y respaldo	150
Fig. 3.34 Ingreso de propiedades de material JIS G-3132 en SAP2000	152
Fig. 3.35 Ingreso de propiedades de secciones transversales en SAP2000	153
Fig. 3.36 Ingreso de propiedades de tubo T50X50X2	153
Fig. 3.37 Importación de la estructura media de la unidad Feline en SAP2000	154
Fig. 3.38 Importación de la estructura posterior de la unidad Feline en SAP2000	155
Fig. 3.39 Vista frontal en perspectiva del modelo importado en SAP2000	156
Fig. 3.40 Vista en perspectiva del modelo matemático representativo de la unidad Feline en SAP2000	157
Fig. 3.41 Condiciones de borde en SAP2000	158
Fig. 3.48 Condiciones de borde del modelo matemático de la unidad Feline	159
Fig. 3.49 Esquema de columna y ubicación de centro de gravedad	167
Fig. 3.50 Aplicación de cargas en caluelas laterales y posterior al modelo matemático de la unidad Feline de Miral.	172
Fig. 3.51 Aplicación de cargas de frenado al modelo matemático de la unidad Feline de Miral.	173
Fig. 3.52 Aplicación de cargas de viento al modelo matemático de la unidad Feline de Miral.	173
Fig. 3.53 Aplicación de cargas dinámicas (normalizadas) al modelo matemático de la unidad Feline de Miral.	174
Fig. 3.54 Casos de análisis aplicados al modelo matemático de la unidad Feline.	175

Fig. 4.1 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC1.	180
Fig. 4.2 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC2.	181
Fig. 4.3 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC3.	182
Fig. 4.4 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC4.	183
Fig. 4.5 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC5.	184
Fig. 4.6 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC6.	185
Fig. 4.7 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC7.	186
Fig. 4.8 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC8.	187
Fig. 4.9 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC9.	188
Fig. 4.10 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC10.	189
Fig. 4.11 Diagrama de fuerza axial en cada miembro de la estructura	190
Fig. 4.12 Diagrama de torque de cada miembro de la estructura.	190
Fig. 4.13 Diagrama de momento flector de cada miembro de la estructura.	192
Fig. 4.14 Estructura deformada bajo la acción de carga crítica.	193
Fig. 4.15 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 (SC9).	194
Fig. 4.16 Geometría de la Zona Crítica 1.	196
Fig. 4.17 Distribución de esfuerzos de la Zona Crítica 1.	197
Fig. 4.18 Elementos considerados en el análisis de Zona Crítica 1.	198
Fig. 4.19 Modelado y aplicación de cargas Zona Crítica 1.	199

Fig. 4.20 Distribución de esfuerzos Zona Crítica 1.	200
Fig. 4.21 Distribución de esfuerzos en zonas cercanas al eje posterior.	201
Fig. 4.22 Distribución de esfuerzos en zonas cercanas al eje posterior.	201
Fig. 4.23 Distribución de esfuerzos en zonas cercanas a la puerta de ingreso.	202
Fig. 4.24 Distribución de esfuerzos en zonas cercanas a la puerta de ingreso.	203
Fig. 4.25 Ubicación del elemento 228	205
Fig. 4.26 Fuerzas internas actuantes en elementos FRAME en SAP2000	206
Fig. 4.27 Resumen de propiedades, cargas aplicadas, índice demanda/capacidad y resultados diseño detallado por el elemento 228	220
Fig. 4.28 Resumen de propiedades, cargas aplicadas, índice demanda/capacidad y resultados diseño detallado por el elemento 449	225
Fig. 4.29 Resumen de propiedades, cargas aplicadas, índice demanda/capacidad y resultados diseño detallado por el elemento 1298	225
Fig. 4.30 Resumen de propiedades, cargas aplicadas, índice demanda/capacidad y resultados diseño detallado por el elemento 1727	226
Fig. 4.31 Resumen de propiedades, cargas aplicadas, índice demanda/capacidad y resultados diseño detallado por el elemento 211	227
Fig. 4.32 Resumen de propiedades, cargas aplicadas, índice demanda/capacidad y resultados diseño detallado por el elemento 1414	232
Fig. 4.31 Distribución de esfuerzos en el lado interno del ángulo	

de anclaje delantero izquierdo	233
Fig. 4.32 Distribución de esfuerzos en el lado de conexión al chasis del ángulo de anclaje delantero izquierdo	234
Fig. 4.33 Modelado y aplicación de cargas en junta lateral sobre abertura para neumático derecho.	235
Fig. 4.34 Distribución de esfuerzos en la parte delantera de la junta	236
Fig. 4.35 Distribución de esfuerzos en la parte posterior de la junta	236
Fig. 4.36 Distribución de esfuerzos en la soldadura horizontal-vertical de la parte delantera de la junta	237
Fig. 4.37 Distribución de esfuerzos en el perno de anclaje carrocería-chasis	238
Fig. 4.38 Distribución de esfuerzos en el techo de la unidad	239
Fig. 4.39 Distribución de esfuerzos en los pisos de las cajuelas posterior y laterales de la unidad	239
Fig. 5.1 Rediseño de zona de los neumáticos.	244
Fig. 5.2 Refuerzo de zona de puerta de ingreso.	245
Fig. 5.3 Refuerzo de uniones respaldo-laterales.	246
Fig. 5.4 Refuerzo de zona central del respaldo.	246
Fig. 5.5 Rediseño de las cajuelas laterales.	248
Fig. 5.6 Eliminación de soporte intermedio.	249
Fig. 5.7 Comprobación de diseño de la parte posterior de la estructura.	252
Fig. 5.8 Comprobación de diseño de la parte delantera de la estructura.	252

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1 Resistencias de materiales comúnmente utilizados en la fabricación del bastidor del chasis	21
---------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Tabla 2.2 Aspectos de diseño de carrocerías de autobuses	26
Tabla 2.3 Factores de incidencia y características de la carrocería que influyen en el desempeño del vehículo	29
Tabla 3.1 Coeficientes de resistencia aerodinámica al avance para vehículos y autobuses.	111
Tabla 3.2 Atmósfera estándar.	112
Tabla 3.3 Especificaciones generales del chasis de la unidad de transporte Feline de Miral.	138
Tabla 3.4 Dimensiones generales de la unidad de transporte Feline de Miral.	140
Tabla 3.5 Especificaciones de perfiles de la unidad de transporte Feline de Miral según parte estructural.	141
Tabla 3.6 Resumen de perfiles utilizados en la unidad Feline de Miral.	142
Tabla 3.7 Propiedades mecánicas de perfiles utilizados en la construcción de la unidad Feline de Miral.	143
Tabla 3.8 Especificaciones del proceso de soldadura utilizado en la construcción de la unidad Feline de Miral.	144
Tabla 3.9 Propiedades mecánicas de materiales utilizados en la construcción de la unidad Feline de Miral.	151
Tabla 3.10 Cargas exigidas por normativos que consideran en el análisis de la unidad Feline de Miral.	161
Tabla 3.11 Cargas del tren de potencia.	161
Tabla 3.12 Cargas necesarias para el funcionamiento de la unidad.	161
Tabla 3.13 Carga total actuante sobre la unidad de transporte Feline de Miral.	162
Tabla 3.14 Clasificación de las cargas de funcionamiento por su ubicación	162
Tabla 3.15 Cargas vivas analizadas	163
Tabla 3.16 Masas de la estructura por partes.	165

Tabla 4.1 Elementos que registran las mayores cargas axiales en la estructura de la unidad Feline.	191
Tabla 4.2 Elementos que registran las mayores torques en la estructura de la unidad Feline.	192
Tabla 4.3 Elementos que registran los mayores momentos flectores en la estructura de la unidad Feline.	192
Tabla 4.4 Nodos donde se registran los mayores desplazamientos verticales	193
Tabla 4.5 Nodos donde se registran los mayores desplazamientos resultantes.	193
Tabla 4.6 Carga aplicada sobre los ejes del chasis de la unidad Feline.	195
Tabla 4.7 Fuerzas axiales en elementos considerados para análisis en Zona Crítica 1.	199
Tabla 4.8 Elementos seleccionados para análisis.	204
Tabla 4.9 Cargas aplicadas al elemento 228.	205
Tabla 4.10 Tendencia a pandeo local de los elementos de la unidad Feline.	212
Tabla 4.11 Torques de diseño para los elementos tubulares de la unidad Feline.	217
Tabla 4.12 Elementos que presentan esfuerzos medios y alternantes de consideración en el análisis de fatiga global de la unidad Feline.	224
Tabla 4.13 Cargas de análisis aplicadas a la junta lateral sobre abertura para neumático derecho.	235
Tabla 5.1 Elementos con menor Factor de seguridad a fatiga de la estructura rediseñada de la unidad Feline de Miral.	253
Tabla 5.2 Carga aplicada sobre los ejes del chasis de la unidad	

NOMENCLATURA

K	Rigidez
P	Carga axial aplicada,
Δ	Desplazamiento.
E	Módulo de elasticidad o modulo de Young (primer orden)
G	Módulo de elasticidad a cortante o de segundo orden
I	Momento de inercia,
I_x e I_y	Momentos de inercia de la sección transversal
J	Momento polar de inercia de la sección transversal
A	Área de la sección.
F	Fuerza aplicada.
k	Constante de rigidez del resorte.
x	Desplazamiento.
$\{F\}$	Vector fuerza
$[K]$	Matriz de rigidez
$\{X\}$	Vector desplazamiento
L	Longitud del elemento
δ	Deflexión
$[P]$	Vector de carga que contiene todas las fuerzas que actúan en las coordenadas estructurales
$[\Delta]$	Vector desplazamiento generalizado que contiene los desplazamientos de cada una de las coordenadas estructurales
$[K]$	Matriz de rigidez
$[p]$	Vector de cargas internas del elemento ¹
$[\delta]$	Vector de desplazamientos nodales del elemento

¹ Letras minúsculas indican que se trata de un elemento en particular

- $[k]$ Matriz de rigidez del elemento.
- $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ Desplazamientos nodales en coordenadas locales
- $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ Desplazamientos en coordenadas globales
- $R]$ Matriz de transformación o rotación
- K_{ii} Bloque de la matriz de rigidez que toma en cuenta la variación de las fuerzas internas en el nodo i debido a desplazamientos virtuales desarrollados en el mismo nodo.
- K_{ij} Bloque la matriz de rigidez que toma en cuenta la variación de las fuerzas internas en el nodo i debido a desplazamientos virtuales desarrollados por el nodo j .
- K_{ji} Bloque la matriz de rigidez que toma en cuenta la variación de las fuerzas internas en el nodo j debido a desplazamientos virtuales desarrollados por el nodo i .
- K_{jj} Bloque de la matriz de rigidez que toma en cuenta la variación de las fuerzas internas en el nodo j debido a desplazamientos virtuales del mismo nodo.
- K Constante de los resortes
- b Constante de amortiguamiento
- X Desplazamientos esperados
- U Fuerza que actúa en la masa amortiguada.
- W Altura de las irregularidades de la vía.
- M_1 Masas amortiguadas (suspendidas),
- M_2 Masas sin amortiguar (no suspendidas).
- $s_1(t)$ ecuación que simula las condiciones del mal estado de la vía
- $u(t)$ ecuación de excitación de la vía.
- D Fuerza de resistencia ejercida por las moléculas de la masa de aire que rodea la unidad y que se oponen al movimiento de la misma

C_D	Coeficiente de resistencia al avance,
ρ	Densidad del aire en el lugar donde el vehículo presta servicio
V	Velocidad de traslación del vehículo
A	Area proyectada frontal de la carrocería, en sección transversal.
G	Aceleración de la gravedad.
t	tiempo, (s)
W	peso (lb)
T	par máximo del motor, (lb.ft)
F_G	Fuerza de giro que absorbe la estructura
M	Masa de la unidad completamente cargada (peso bruto vehicular).
V	Velocidad de traslación de la unidad
r	Radio de curvatura de la trayectoria seguida.
a	Aceleración
v	Velocidad final
v_o	Velocidad inicial
f_r	Fuerza de fricción en el frenado.
f_a	Fuerza de fricción en el aceleración.
μ	Coeficiente de rozamiento estático (sin deslizamiento).
g	Aceleración de la gravedad
N	Fuerza de Reacción Normal
W_{ENC}	Trabajo de las fuerzas no conservativas
ΔE_c	Variación de la energía cinética
d	Distancia
q	Carga sobre cajuelas y techo
a_f	Area frontal
V_t	Velocidad de traslación
n	Número de nodos en los que se aplica la carga
W_B	Distancia entre ejes
W_f	Peso eje delantero
L	Saliente de masa de la carrocería

H_B Altura del centro de gravedad desde el bastidor
 H_F Altura del neumático delantero cargado
 H_R Altura del neumático trasero cargado
 H_c Altura de la superficie del bastidor al piso
 H_D Altura del centro de gravedad de la carrocería.
 H Altura del centro de gravedad total
 P_c Peso de la unidad (cargas constantes)
 P_V Peso de la unidad (cargas viajeros)
 P Peso total de la unidad
 f_1, f_2 Factores de ponderación.
 a ancho total de la unidad

K_e Densidad de carga de la estructura carga (kg/m)
 W_e Masa de la estructura (kg).
 L_e Longitud de la estructura (m).
 H Altura de la sección estructural
 B Ancho de la sección estructural
 t Espesor de la sección estructural
 A_g Área total de la sección (gross area)
 I Momento de inercia
 r radio de giro de la sección
 l longitud del elemento estructural
 S Módulo elástico de la sección
 Z Módulo plástico de la sección
 E Módulo de elasticidad del material
 G Módulo de elasticidad por cortante del material
 F_y Esfuerzo de fluencia
 ϕ_c Factor de carga a compresión
 ϕ_b Factor de carga a flexión
 ϕ_v Factor de carga a cortante

ϕ_T	Factor de carga a torsión
k	Factor de longitud efectiva
λ_c	Parámetro de esbeltez a compresión
Fcr	Carga crítica
ϕP_n	Resistencia de diseño a compresión
λ_p	Tasa de esbeltez
P_y	Resistencia a la fluencia axial
λ_p	Tasa de esbeltez plástica
Lp1	Límite de pandeo lateral torsional
M_y	Momento elástico
M_p	Momento plástico
ϕM_n	Momento de diseño
A_w	Área de resistencia a cortante
F_n	Resistencia crítica a cortante
ϕV_n	Resistencia de diseño a cortante
$F_{cr_{torsión}}$	Carga crítica a torsión
T_u	Torque aplicado
C	Constante torsional de la sección
ϕT_n	Torque de diseño
A_m	Área delimitada por la línea media
τ	Esfuerzo cortante en sección HSS
ϕ_{fl}	Esfuerzo de fluencia
τ_{fl}	Límite al corte
FS	Factor de seguridad
σ_n	Esfuerzo normal debido a cargas axiales
M1	Máximo momento aplicado
M2	Mínimo momento aplicado
σ_f	Esfuerzo normal debido a momentos flectores
σ_{MAX}	Esfuerzo máximo a fatiga (según AISC)

σ_m Esfuerzo medio

σ_a Esfuerzo alternante

RESUMEN

La industria de construcción de unidades de transporte público es uno de los sectores productivos con mayores perspectivas de desarrollo en el mercado ecuatoriano por el gran movimiento que presenta en la actualidad debido a normalizaciones y regulaciones impuestas por organismos seccionales, tanto locales como nacionales, cuyo efecto inmediato ha sido el incremento de la demanda. El número de empresas es alto, consecuentemente el nivel de competencia del sector exige de cada empresa la inversión de tiempo y recursos en investigación para la consecución del mejoramiento y optimización de sus productos y el aseguramiento de su permanencia en el mercado.

Comprometida con la realidad del Ecuador y gracias a su filosofía de apoyo al avance científico y tecnológico, la empresa Miral Buses, dentro de su programa de comprobación ingenieril de diseños y procesos, apoya iniciativas tendientes a la investigación y desarrollo de nuevas soluciones con el contingente profesional del Departamento de Diseño y la información y experiencia necesarias para su desarrollo.

Una de esas iniciativas es la realización del presente proyecto, que busca analizar la estructura de la unidad de transporte de pasajeros Feline para determinar su resistencia ante las condiciones de carga a las cuales es sometida en operación; entregar información acerca del comportamiento de los miembros estructurales para determinar si se produce fallo o rotura de los mismos y recomendar el rediseño de componentes que lo ameriten, contribuyendo de este

modo a la mejor utilización de los materiales e insumos y a la correcta distribución de esfuerzos en la estructura.

Para alcanzar el objetivo planteado, se propuso primeramente la recopilación de información relevante que brinde un espectro adecuado de conocimiento y que permita enfocar el estudio en temas de real interés para el proyecto.

Dentro de este contexto se analiza las partes que conforman el sistema estructural de esqueleto de una unidad de transporte moderna, donde destacan el chasis y la estructura propiamente dicha como elementos de absorción de cargas, y las partes constitutivas de la misma como se puede ver en la Fig. 1.

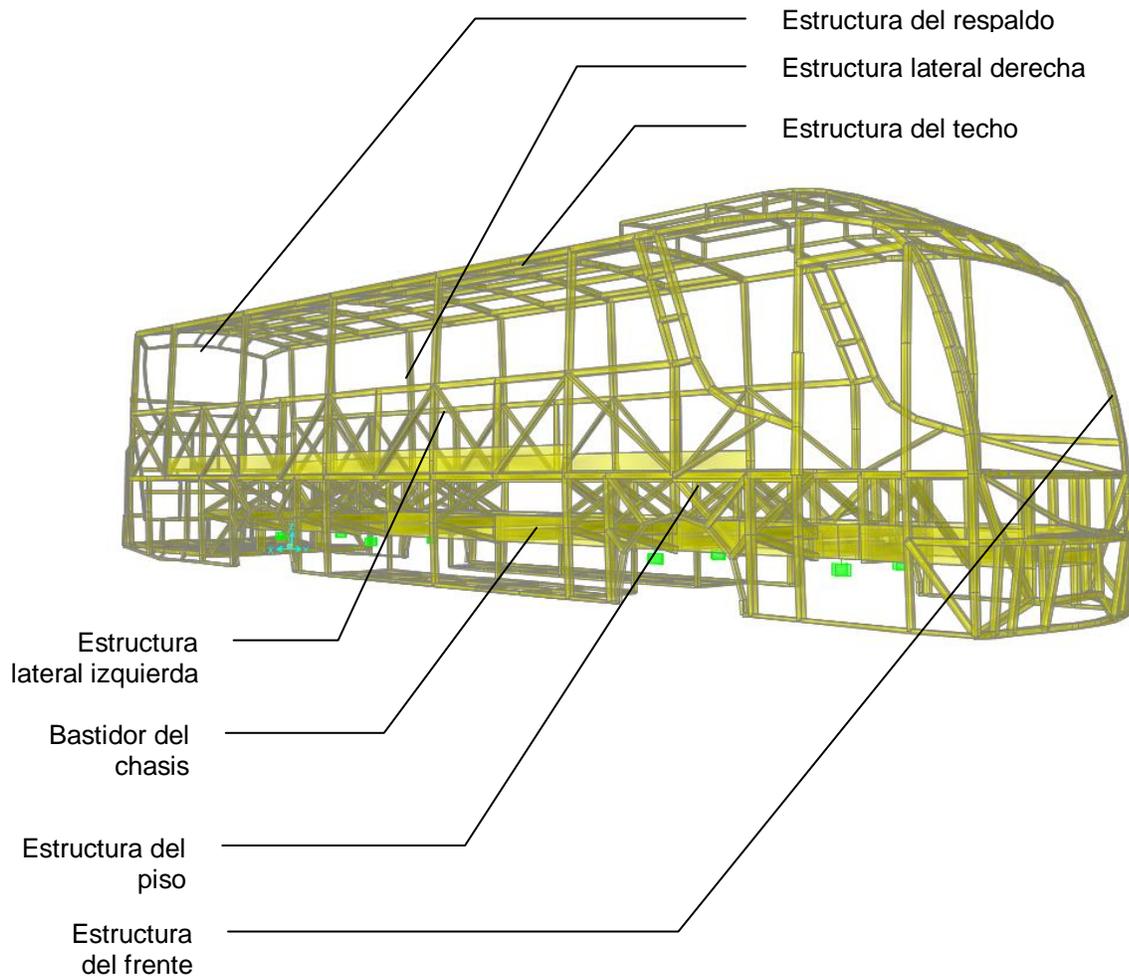


Fig. 1 Partes del sistema estructural de la unidad de transporte Feline

Del mismo modo se analiza el principio distribución de cargas dentro de una unidad de transporte de pasajeros, que estipula que para el análisis de la misma se debe considerar como una unidad estructural integrada, donde las cargas son soportadas tanto por el chasis como por la estructura (ver Fig. 2).

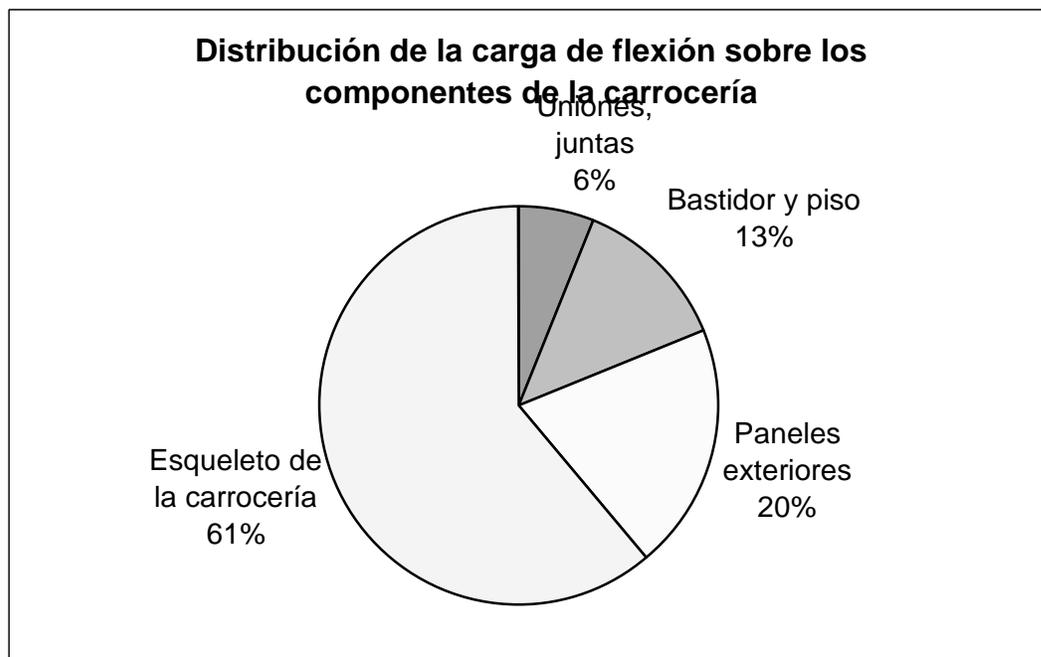


Fig. 2 Distribución de la carga de flexión sobre los componentes de la carrocería

El estudio de temas específicos relacionados con el comportamiento de estructuras para autobuses, unido con criterios de ingeniería, normativas y de aplicación matemática, permitieron el diseño de una metodología de simulación y análisis aplicable a una estructura de autobús en general.

Es de especial relevancia el criterio de simulación de cargas, que en primer lugar engloba, desde el punto de vista teórico de ingeniería, todas las cargas individuales a las cuales es sometida la estructura en funcionamiento, como son:

- cargas de pasajeros,
- cargas de frenado violento,
- cargas dinámicas fluctuantes producidas por irregularidades en las vías analizadas específicamente para la unidad Feline de Miral, entre otras.

Pero, dado que dichas cargas no actúan de manera individual sobre la unidad, sino de manera simultánea y agrupada, se plantea, en segundo lugar, la agrupación de las mismas de acuerdo a sus condiciones físicas de incidencia en las llamadas situaciones de carga. Las situaciones de carga constituyen combinaciones de cargas individuales que se presentan en la estructura de acuerdo a la condición de funcionamiento a la cual se someta la misma. Se plantean diez situaciones de carga que abarcan condiciones de funcionamiento como frenado violento en línea recta, aceleración en curva rápida, frenado en curva en mal estado, entre otras (ver Fig. 3).

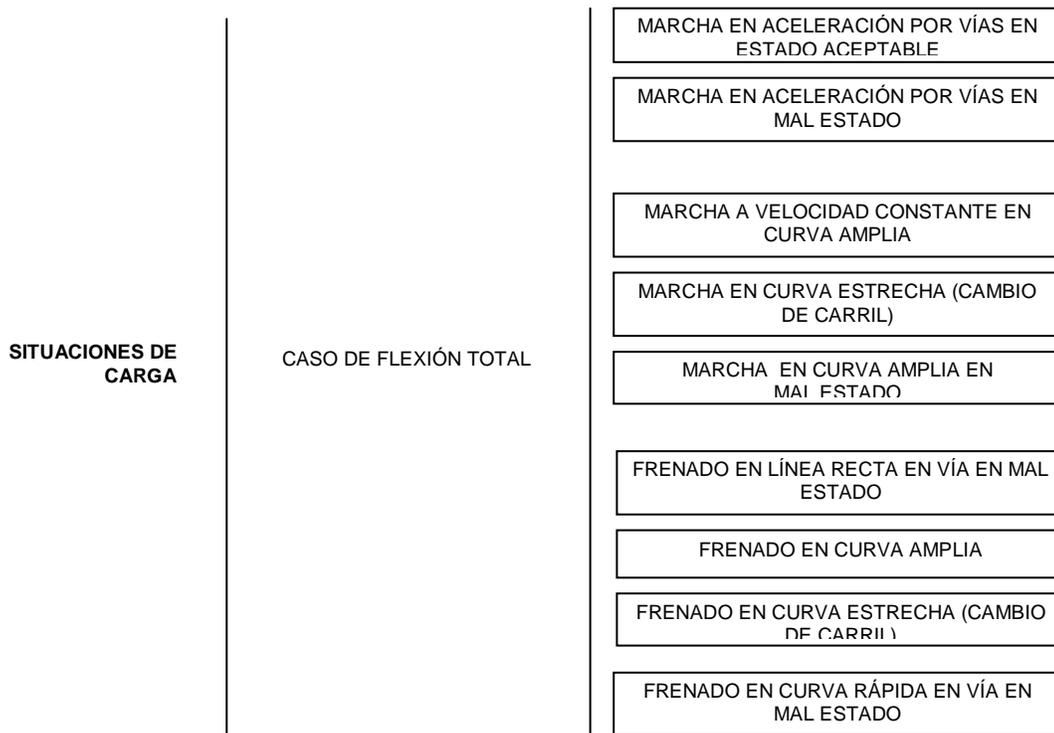


Fig. 3 Situaciones de carga para análisis a flexión

Seguidamente se realizó el modelado y simulación de la unidad Feline aplicando los conceptos expuestos en el diseño de la metodología general, reproduciendo su geometría con gran apego a la realidad, simulando cargas con datos actuales de la misma y utilizando ayudas computacionales adecuadas, así, para el modelado unifilar se utilizó el software AutoCad 2006, para el modelado en tres dimensiones, SolidWorks 2006, para la simulación de la estructura completa se utilizó el software estructural SAP2000 9.3, y para la simulación de elementos particulares, CosmosWorks 2006, dada la aceptación y buen desempeño de los programas mencionados y después de un análisis de sus capacidades.

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones propuestas se procedió al análisis de cada situación de carga, para lo cual se adoptó criterios estipulados en normas internacionales, principalmente del Instituto Americano de la

Construcción en Acero con su Diseño por Factor de Carga y Resistencia para Secciones Estructurales Tubulares de Acero.

Se estableció que la situación de carga crítica es la SC9 (ver Fig. 4), por lo que se extendió el análisis bajo las condiciones de la misma. Se encontró que el elemento 228 (ver Fig. 7) es el más solicitado de la estructura por su ubicación y esfuerzos soportados, por lo que se realizó un análisis detallado del mismo. Se llegó a comprobar los resultados obtenidos por SAP2000 en ciertos casos, siendo necesario calcular parámetros que el programa no otorga, como es el caso del análisis a torsión y a fatiga del elemento. Dicho análisis se extendió para todos los elementos de la estructura. Una vez comprobada la fiabilidad del programa, se observaron los detalles de otros elementos de interés.

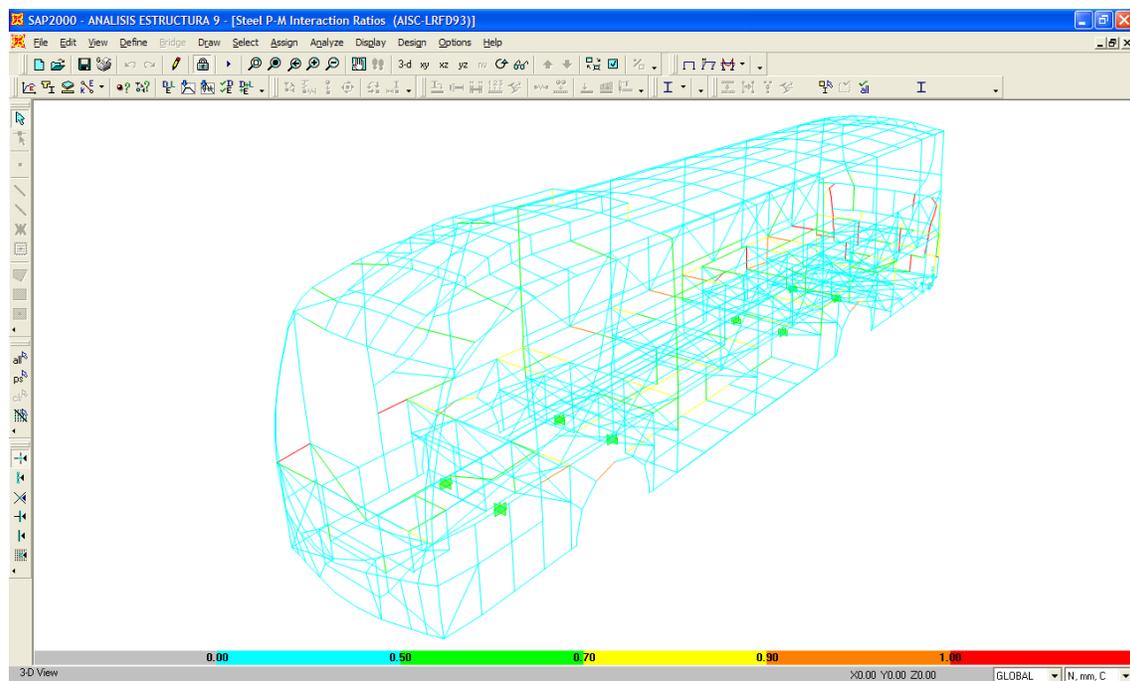


Fig. 4 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 (SC9).

Se estudió zonas consideradas críticas por la incidencia de esfuerzos, siendo una de las mas importantes la zona de transición piso – cajuela (zona critica 1: ver Figs. 5-7) y se analizó elementos específicos para averiguar su

comportamiento mediante CosmosWorks. Del mismo modo, se determinó las zonas y elementos sometidos a bajas solicitaciones.

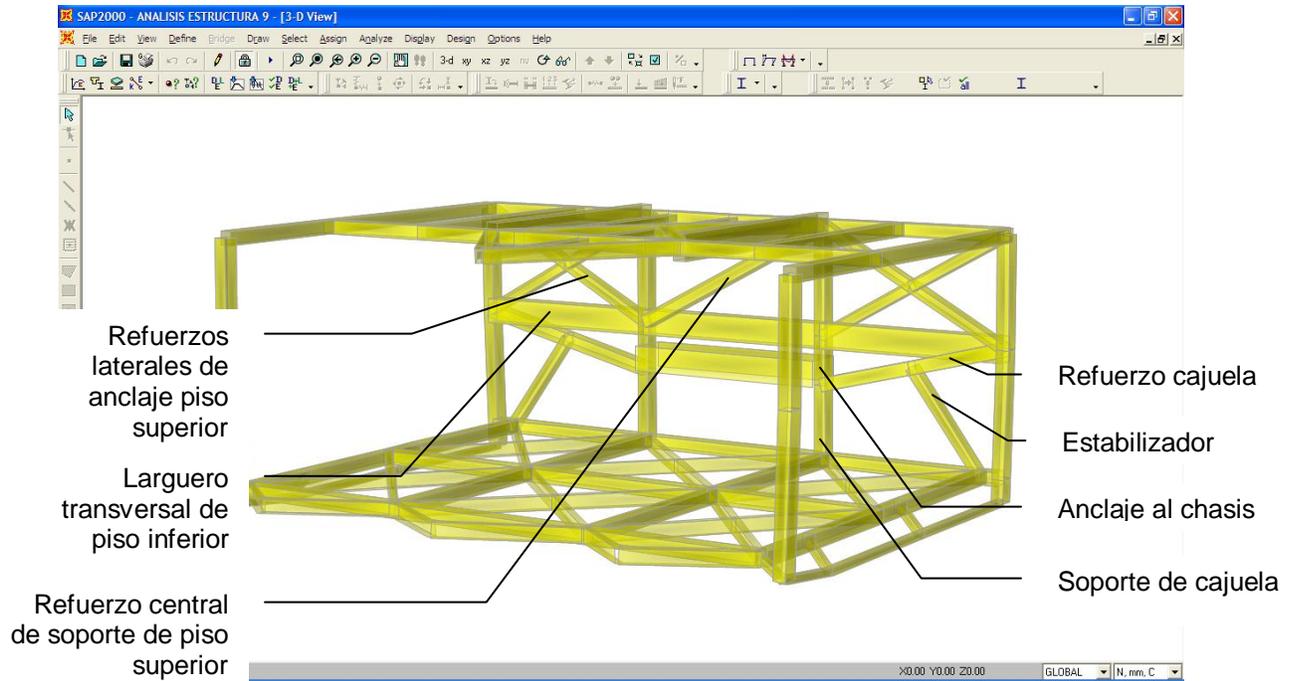


Fig. 5 Geometría de la Zona Crítica 1.

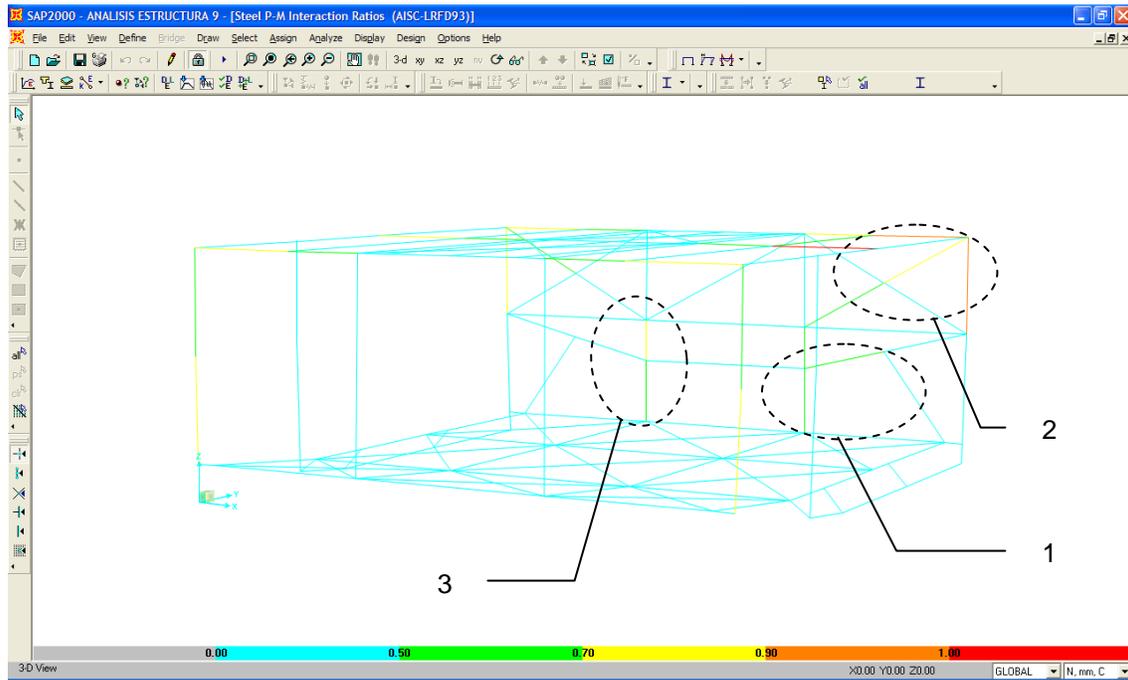


Fig. 6 Distribución de esfuerzos de la Zona Crítica 1 (SAP2000)

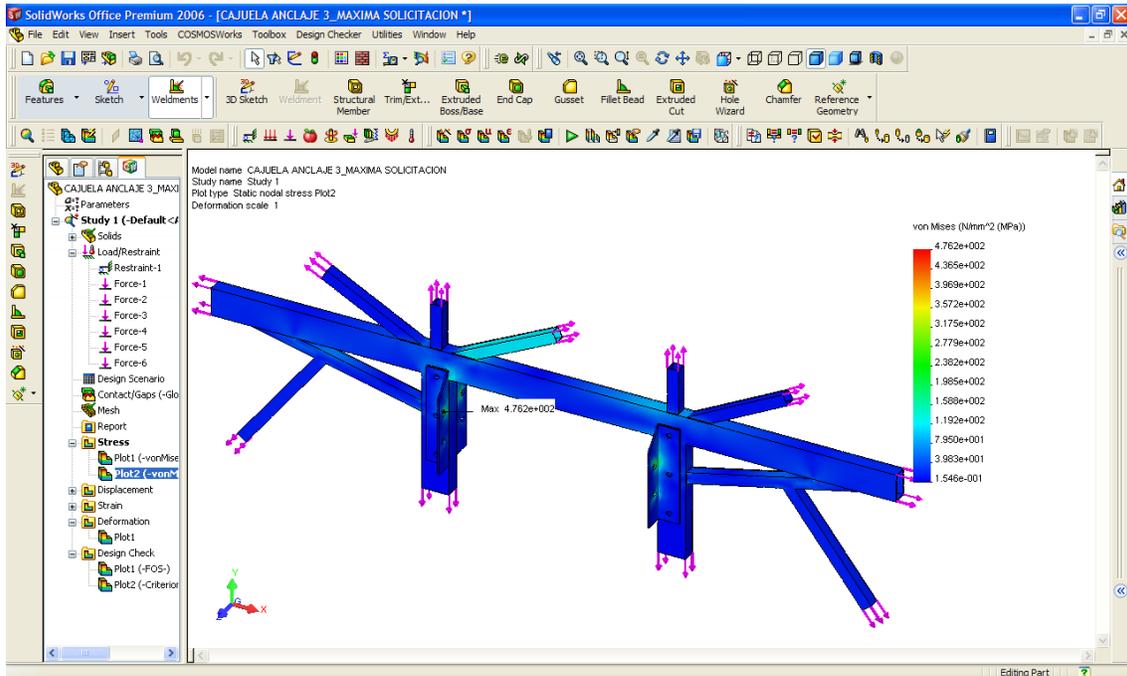


Fig. 7 Distribución de esfuerzos Zona Crítica 1 (COSMOSWORKS)

Con el conocimiento del comportamiento de la estructura, se propuso cambios en la geometría y propiedades de miembros de la misma, para mejorar su respuesta frente a las cargas aplicadas, tales como la reducción de espesores en elementos del piso de cajuelas, tanto laterales como posterior, entre otros, y el aumento de espesores en miembros del piso superior y soporte posterior de la puerta de ingreso, entre los mas significativos. Se rediseñó las zonas de las aberturas para los neumáticos, la zona de anclaje al chasis delante del eje posterior, entre otras,

Se procedió a la comprobación mediante simulación de la estructura rediseñada bajo las mismas condiciones de la estructura original, demostrándose que los cambios mejoran su comportamiento, uniformizando la distribución de esfuerzos que soporta la unidad, reduciendo el peso total de la misma en un 3% y aumentando su capacidad volumétrica en cajuelas en un 20%.

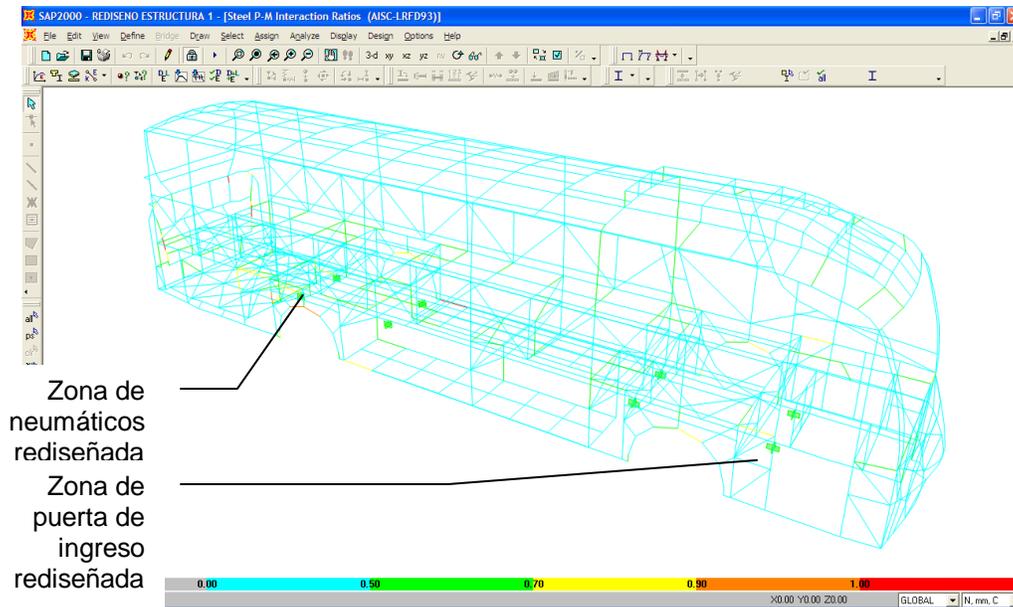


Fig. 8 Comprobación de diseño de la de la estructura.

Como complemento del estudio estructural realizado, se comprobó la resistencia de la unidad a pruebas de vuelco establecidas en normas nacionales (INEN y Metrobus) y norteamericanas, con la aplicación de cargas normalizadas en el techo de la unidad; y europeas, con la simulación de la caída de una sección representativa de la misma desde una altura normalizada. Este estudio se lo realiza para verificar la resistencia de la unidad ante eventuales sucesos de volcamiento.

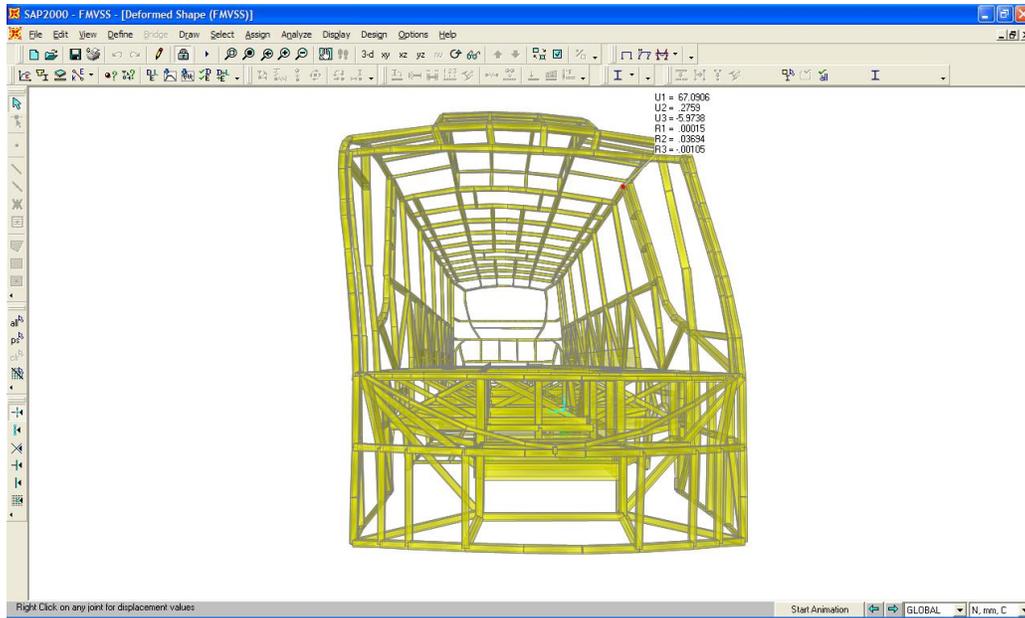


Fig. C.13 Estructura deformada (vista del frente). Estándar 216.

Se estudió también aspectos fundamentales referentes a uniones de elementos estructurales principalmente mediante soldadura, porque de ellos depende el comportamiento de la estructura real, recomendando prácticas idóneas desde el punto de vista técnico y de diseño para la obtención de resultados esperados.

De la misma forma, se analizó los costos generados, que evidencian la factibilidad de realizar futuros estudios a nivel nacional por lo accesible de los mismos en comparación con estudios similares realizados por profesionales extranjeros.

Dado lo analizado a través del proyecto, la unidad de transporte de pasajeros Feline de Miral resiste de manera satisfactoria las condiciones a las cuales fue sometida en las diversas simulaciones de resistencia estructural y vuelco gracias al correcto diseño inicial y a la contribución decisiva del análisis y del rediseño para lograr una estructura segura y confiable

SUMMARY

Bus body structure analysis is vital in the design and develop of new bus models. Starting in drawings, passing through manufacture, welding and joining methods and ending in comfort details, building a bus requires to know the total amount of passengers that can be conveniently transported and the kind of the service the bus is supposed to offer. Is also needed to attend regulations and standardizations published by governmental and regulation entities, such as EMPSAT (Quito Metropolitan Transport Department), and INEN (Ecuadorian Institute for Standardization) to achieve permissions to build units and to ensure that safety manufacture practices are followed. Structure analysis is the joining process between customer requirements and regulation requirements because it allows to predict the behavior of a particular bus and judge its safety based on engineering criteria.

A transportation unit is exposed to a large amount of external loads which must be absorbed and distributed by the structure. Because of the dynamic nature of loads, to investigate the behavior of a bus is required to build a mathematical model of its structure, to apply realistic load conditions to it and to verify the resistance of the entire structure. First, to build a mathematical model is to perform a real geometric representation of the structure in analysis. In addition, a mathematical model includes all material and joining properties of the structure such as steel yield stress, wall tube thickness, welding points, and so on. Then,

specific loads need to be calculated based on physical laws and engineering knowledge. In fact, load combinations, based on experience and working conditions must be defined and applied to the structure to completely simulate external loads acting on it. Finally, an exhaustive verification is needed to be executed to every member of the structure to know its stress distribution. It is compared with the maximum stress supported by the real material member and, based on standards and design criteria, permits to decide if the element is strong enough to resist applied loads.

As a result, bus structure analysis is a powerful tool which helps structural and automotive engineers to test its bus designs in real conditions. The behavior of a bus structure is based in which kind of loads are applied and how are absorbed and distributed by its elements. Bus body structure analysis gives engineers essential information to understand the response of the bus against the worst working conditions, to decide to make changes on geometry and members of the structure to keep its resistance and to reduce element sizes, where is possible, to decrease production costs.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción de carrocerías metálicas en nuestro país tuvo sus orígenes en influencias extranjeras; expertos no nacionales construían sus unidades en el país de forma empírica con conocimientos y técnicas basadas en experiencia, con procedimientos de diseño repetitivos y aplicando a todos sus productos los mismos parámetros, sin saber si son realmente convenientes y eficientes.

Dado que la producción de carrocerías dejó de ser un oficio artesanal y unitario para convertirse en una industria de producción en masa debido a la demanda del mercado y a las oportunidades que éste ofrece, es imperioso que los productores apliquen principios y criterios de ingeniería de análisis y simulación para asegurar un producto de calidad confiable y alta durabilidad, minimizando desperdicios de materia prima y horas/hombre.

MIRAL BUSES es la empresa líder en producción de autobuses urbanos e interprovinciales en el Ecuador, con gran acogida en el Distrito Metropolitano de Quito y gran demanda en el mercado interprovincial con unidades presentes en las principales vías del país.

Para MIRAL BUSES, la implementación del proyecto significa optimización de metodologías para el Departamento de Ingeniería de la empresa, lo que se traduce en un mejoramiento la calidad y fiabilidad en el diseño del producto y reducción de costos, que son las bases para consolidarse y mantenerse como productor líder a nivel nacional y ampliar sus perspectivas internacionales. Del mismo modo, el apoyo al presente proyecto concuerda con su filosofía de desarrollo y mejoramiento de tecnologías nacionales.

1.2 ANTECEDENTES

Una de las características de la mayoría de las industrias carroceras que cubren el mercado actual es la falta de aplicación de principios de diseño de ingeniería. En general y con ciertas excepciones, no se construye un autobús en función de su aplicación ni de la carga que va a soportar: se lo hace de forma empírica basándose en modelos anteriores y en experiencia. Esto se debe principalmente a que gran parte de las industrias construyen sin aplicar metodologías de análisis y simulación que validen sus estructuras.

En un intento por normalizar la construcción de autobuses urbanos para el Distrito Metropolitano de Quito, la Empresa Metropolitana de Servicios y Administración del Transporte (EMSAT) adoptó las normativas de diseño, cálculo y fabricación de unidades urbanas estipuladas por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) mediante la norma “Vehículos automotores. Bus urbano. Requisitos” NTE INEN 2205:99 en el año de 1999. Por este motivo, los productores tanto grandes como medianos y pequeños comenzaron a buscar la manera de que sus unidades sean aprobadas por EMSAT para circular en Quito, debido a que el plan de modernización de unidades abría un mercado competitivo y de mucho interés económico. Se dieron los primeros pasos en el análisis y simulación de estructuras de buses aplicando lo mejor del software de la época.

Con el tiempo las exigencias se flexibilizaron por parte de la EMSAT, reduciendo la rigurosidad de los controles y otorgando permisos con mayor facilidad. Sin embargo, los criterios de control permanecen y las empresas que no demuestren resistencia en sus unidades no pueden ponerlas en circulación en la ciudad de Quito.

En la actualidad se ha propuesto implementar este tipo de controles y normativas en diversas ciudades del país como es el caso de Guayaquil y Cuenca, con proyectos de características similares. Del mismo modo a nivel de transporte interprovincial y de turismo se vislumbra la incursión de organismos

de control que regulen la calidad de los productos nacionales analizando sus características técnicas, y extendiendo autorizaciones de fabricación a las empresas.

1.2.1 NECESIDAD INSATISFECHA

El mercado ecuatoriano requiere unidades que cumplan con las normativas INEN vigentes para su construcción, tanto en el campo urbano con la norma “Vehículos automotores. Bus urbano. Requisitos” NTE INEN 2205:99 como en el caso de la unidad de pasajeros FELINE, a la cual es aplicable las normas “Vehículos automotores. Carrocerías metálicas. Requisitos” NTE INEN 1323:85 y “Vehículos automotores. Carrocerías Metálicas para Buses Interprovinciales. Requisitos” NTE INEN 1668:88.

1.2.2 REQUERIMIENTOS

Las empresas carroceras con visión en el mercado del futuro inmediato requieren la aplicación de metodologías de análisis y simulación para sus unidades:

- que les permitan incursionar en el competitivo y cada vez más importante sector del transporte de turistas nacionales e internacionales, donde en un futuro se tendrán regulaciones y normas, y de ese modo adquirir ventaja estratégica y competitiva;
- y que brinden a los planificadores de producción el conocimiento del producto que sacan al mercado y las herramientas para tomar decisiones en cuanto a materiales empleados, mano de obra implementada, tecnologías de fabricación, etc.

1.3 OBJETIVO GENERAL

Realizar el análisis de la estructura de la carrocería del autobús de transporte interprovincial para la empresa ensambladora MIRAL BUSES para determinar su resistencia ante las condiciones de carga a las cuales es sometida en operación; entregar información acerca del comportamiento de los miembros estructurales y recomendar el rediseño de componentes que lo ameriten.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar el sustento teórico necesario para el desarrollo del proyecto, incluyendo la revisión de normas aplicables a la construcción de carrocerías metálicas.
- Diseñar e implementar una metodología de análisis y simulación de la estructura del autobús, incluyendo la simulación de cargas de trabajo, que permita estudiar su comportamiento mecánico frente a diversas situaciones de utilización.
- Analizar los resultados obtenidos en función de diversas combinaciones de carga para determinar zonas críticas de la estructura, miembros sometidos a esfuerzos excesivos; así como zonas sobredimensionadas donde las propiedades exceden las exigencias.
- Recomendar el refuerzo de zonas críticas vulnerables, cambio de propiedades de miembros sujetos a falla, cambio o rediseño de zonas sobredimensionadas para contribuir a la optimización del diseño de la estructura.

1.5 JUSTIFICACIÓN

La construcción de carrocerías metálicas es una industria en constante desarrollo e innovación. Un fabricante nacional que quiere ser competitivo y tener presencia en el mercado debe producir diseños funcionales, seguros y con costos aceptables que le permitan tener un buen margen de ganancia y mantener estabilidad de producción que le asegure estadía en el mercado nacional y proyección al mercado internacional.

Las reformas en las regulaciones del transporte urbano, así como los nuevos patrones de calidad del transporte interprovincial y de pasajeros impuestos por la industria extranjera exigen de las empresas nacionales el direccionamiento de sus esfuerzos hacia el cálculo e investigación estructural de sus diseños, mejora en utilización de materia prima y correcta aplicación procesos para lograr reducción de costos.

El presente proyecto pretende estudiar los aspectos fundamentales de resistencia y rigidez de la estructura de la carrocería del autobús Feline de Miral, porque, al ser considerada como unidad estructural sujeta a cargas y portadora de vidas humanas, su diseño y resistencia exigen un estudio teórico-técnico que permita aplicar las leyes de la ciencia e ingeniería para garantizar un comportamiento adecuado en circunstancias reales de utilización.

Una de las empresas nacionales que incursiona con éxito en la fabricación de autobuses urbanos, interprovinciales, de lujo para turismo y de transporte institucional es MIRAL BUSES, una empresa joven cuyo objetivo es la innovación en el diseño y construcción de autobuses mediante la implementación de técnicas modernas de simulación de probada aplicabilidad para fomentar el crecimiento de los profesionales del país y cuya meta es la de ser competitiva y tener presencia en el mercado. Su campo de acción actual se enfoca en la construcción de autobuses Tipo I y II bajo normas INEN que rigen el

transporte en la ciudad de Quito: “Vehículos automotores. Bus urbano. Requisitos” NTE INEN 2 205:99 gracias a ser una de las cuatro primeras empresas nacionales en alcanzar la validación por parte de EMSAT.

Entre las perspectivas de la empresa se cuenta atacar mercados dominados hasta la fecha por productores internacionales porque es inherente la capacidad técnica y operativa unida a la experiencia para incursionar con éxito en los mismos. Este es el caso del sector de transporte interprovincial y de turistas, que se caracteriza por el lujo y confort de sus unidades, seguridad, maniobrabilidad, buena resistencia estructural y baja resistencia aerodinámica.

Gracias a las homologaciones alcanzadas por parte de los principales constructores de chasis en el mundo, siendo una de las últimas y más meritorias la otorgada por Scania de Suecia, al ser la primera empresa ecuatoriana en calificar para tal homologación, la empresa pretende incursionar en el mercado de transporte interprovincial y afianzar su competitividad en el mercado nacional en este segmento particular para ampliar sus perspectivas internacionales apoyada en la bases teórico-investigativas, optimizando la calidad estructural de sus productos y presentando diseños exclusivos en el mercado con características únicas, porque es conciente de que depende del buen criterio de diseño, cumplimiento de parámetros de resistencia de cargas, aplicabilidad, funcionalidad y durabilidad de su estructura, el éxito que se alcance en el mercado.

Por medio del estudio de la resistencia de la estructura de la carrocería de la unidad Feline, MIRAL tendrá información de primera mano de la resistencia de su estructura, lo que repercute directamente en el mejoramiento en calidad del producto que entrega para así satisfacer las necesidades del cliente. Del mismo modo la información proporcionada por el estudio le permitirá tomar decisiones permisibles de diseño en cuanto a cambiar y/o eliminar elementos

sobredimensionados, bajando los costos de producción, que es el objetivo final del productor para aumentar el margen de ganancia.

1.6 ALCANCE

El proyecto contempla la realización del análisis estático y dinámico de la estructura bajo cargas de trabajo, determinación de esfuerzos críticos en miembros estructurales y rediseño mediante redimensionamiento de miembros o cambio de geometría donde las condiciones de fallo ameriten. De este modo, se obtendrá importante información acerca del comportamiento elástico de la carrocería:

- Estados de carga: aceleración, frenada, curva, incidencia del viento.
- Zonas críticas de la estructura.
- Simulación del comportamiento elástico de la estructura en las condiciones de carga estudiadas.
- Determinación de miembros sometidos a mayor grado de esfuerzos y deformaciones.

Es pertinente anotar que las simulaciones serán computarizadas y generadas para una marca y modelo específico de chasis, que se determinará según las estadísticas de la empresa como la de mayor demanda.

La información obtenida del estudio estático permitirá recomendar el refuerzo de zonas críticas que no cumplen con las condiciones de resistencia necesarias o el rediseño geométrico y dimensional y la utilización de materiales más ligeros en zonas sobredimensionadas.

CAPITULO 2

SUSTENTO TEÓRICO

2.1 CARROCERÍAS METÁLICAS

La carrocería de autobús es el sistema estructural encargado de brindar soporte, fijación y forma a la unidad de transporte, y al mismo tiempo, seguridad a los pasajeros para los cuales está diseñada transportar.

Las carrocerías metálicas están presentes en una gran variedad de vehículos a motor, por lo que inicialmente se expondrán los aspectos principales de los mismos.

2.1.1 VEHÍCULOS DE TRANSPORTE DE PASAJEROS.

Según el Reglamento 36 de la Unión Europea², un vehículo de transporte de pasajeros es una unidad concebida y equipada para el transporte público de más de 16 viajeros.

2.1.1.1 Categorización de los vehículos de transporte.

De acuerdo con la Directriz UNECE TRANS/WP.29/78/Rev.1/Amend.2³, existen 7 categorizaciones para vehículos a motor:

- CATEGORÍA L – Vehículos a motor con menos de cuatro ruedas.
- CATEGORÍA M – Vehículos a motor con al menos cuatro ruedas usados para el transporte de pasajeros.

² Ref [1]

³ Ref [2]

- CATEGORÍA N – Vehículos a motor con al menos cuatro ruedas usados para el cargamento de bienes.
- CATEGORÍA O – Trailers.
- CATEGORÍA T – Tractores para agricultura.
- CATEGORÍA G – Vehículos OFF-ROAD.
- Vehículos para propósitos especiales

Categorías M.

Las categorías M incluyen las unidades de transporte de pasajeros, dentro de las cuales se numeran:

- CATEGORÍA M1: Vehículos usados para el transporte de pasajeros y comprendidos por no más de ocho butacas adicionales a la del conductor



Fig. 2.1 Vehículo de categoría M1.

- CATEGORÍA M2: Vehículos usados para el transporte de pasajeros, comprendidos por más de ocho butacas adicionales a la del conductor y con un peso máximo no mayor a 5 toneladas



Fig. 2.2 Vehículo de categoría M2.

- CATEGORÍA M3: Vehículos usados para el transporte de pasajeros, comprendidos por más de ocho butacas adicionales a la del conductor y con un peso máximo mayor a 5 toneladas



Fig. 2.3 Vehículo de categoría M3.

Clases.

Para los vehículos de las categorías M2 y M3 cuyas capacidades excedan los 22 pasajeros adicionales al conductor se definen tres Clases:

- CLASE I: autobús urbano; vehículo construido con áreas para pasajeros de pie permitiendo su movimiento frecuente.
- CLASE II: autobús o autocar⁴ interurbano; vehículo construido principalmente para transportar pasajeros sentados y diseñado para permitir el transporte de pasajeros de pie únicamente en el pasillo o áreas que no excedan el espacio provisto para las filas de butacas dobles.
- CLASE III: autocar de turismo; vehículo construido exclusivamente para el transporte de viajeros sentados.

Un mismo vehículo puede ser considerado como perteneciente a más de una clase.

2.1.1.2 Clasificación de los vehículos de transporte de pasajeros.

Los vehículos de transporte de pasajeros se clasifican según varios criterios:

Según su *tipo de construcción* se clasifican en:

⁴ El término “autocar” es usualmente utilizado para describir una unidad de transporte con altas prestaciones en cuanto a comodidad y utilizada para recorrer grandes distancias. Su equivalente es “autobús de turismo o interprovincial” según el caso.

- Simple: vehículo automotor constituido de una unidad estructural y en el cual el peso de la carrocería se carga en el chasis.

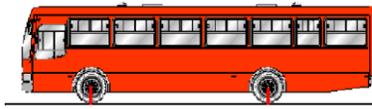


Fig. 2.4 Unidad de transporte de construcción simple.

- Articulado: conjunto formado por dos o más unidades estructurales. Comúnmente se presenta una configuración en la cual se tiene dos unidades estructurales: la anterior conocida como “tren de tracción” proporciona la potencia de arrastre a la posterior o “carreta”.

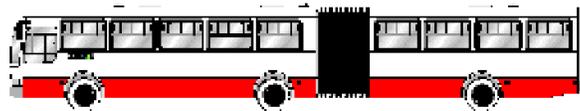


Fig. 2.5 Unidad de transporte de construcción articulada.

Según el *tamaño de la unidad y el número de pasajeros* diseñado para transportar, se tiene:

- Microbús: vehículo con una capacidad de transporte de 8 a 22 pasajeros



Fig. 2.6 Microbús

- Ómnibus: vehículo con capacidad de transporte de mas de 22 pasajeros.

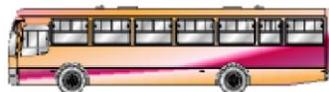


Fig. 2.7 Ómnibus

Según el *número de ejes que posea*, se tiene:

- 4 x 2: con cuatro puntos de apoyo en tierra y 2 de tracción. Es el tipo de unidad generalmente concebida por su versatilidad y abundancia en el mercado.

- 6 x 2: con seis puntos de apoyo en tierra y 2 de tracción.

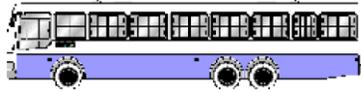


Fig. 2.8 Unidad de transporte 6 x 2

- 8 x 2: con ocho puntos de apoyo en tierra y 2 de tracción.



Fig. 2.9 Unidad de transporte 8 x 2

Según el *segmento del mercado al cual se dirige*⁵, se tiene:

- Transporte institucional: conocido también como de transporte escolar, unidades de hasta 30 pasajeros destinada al transporte de personal de empresas o escolares.



Fig. 2.10 Unidad de transporte institucional

- Transporte de turismo: unidades dotadas de las más altas prestaciones en comodidad y seguridad tanto para tripulantes como para viajeros, con lo último en instrumentación de vigilancia, entretenimiento y bienestar para ofrecer un viaje placentero. Generalmente no son unidades de transporte público ya que prestan servicio de acuerdo a las necesidades del cliente.

⁵ Según la segmentación del mercado ecuatoriano de MIRAL BUSES.



Fig. 2.11 Unidad de transporte de turismo

- Transporte urbano: unidades diseñadas para su circulación en centros urbanos densamente poblados, con espacios considerados para pasajeros de pie. En el Ecuador la norma técnica INEN 2 205:99 provee las especificaciones necesarias para la homologación de unidades de transporte urbano, existiendo las denominaciones de TIPO 1 y TIPO 2, cuyas diferencias consisten en posición del motor, longitud del chasis, frenos, tipo de transmisión, largo total mínimo externo, etc.



Fig. 2.12 Unidad de transporte urbano.

- Transporte Interprovincial: unidades no diseñadas para el transporte de pasajeros de pie, dotadas gran comodidad y de espacios para carga (cajuelas) que los hacen aptos para recorrer grandes distancias.



Fig. 2.13 Unidad de transporte interprovincial.

2.1.2 ASPECTOS FUNDAMENTALES CONCERNIENTES A LAS UNIDADES DE TRANSPORTE DE PASAJEROS.

Las unidades de transporte de pasajeros son sistemas integrales, compuestos por subsistemas con comportamiento sinérgico, que en conjunto constituyen uno de los medios de transporte colectivo más adoptados en el mundo.

Dentro de la gran cantidad de subsistemas que conforman una unidad de transporte encontramos sistemas térmicos, como el motor como unidad de potencia; mecánicos, el sistema de transmisión del movimiento del motor a las llantas; neumáticos, como el sistema de frenos de aire que equipa la mayoría del parque automotor pesado actual; acústicos y audiovisuales, como el sistema de bocinas y reproductor para el confort de los viajeros; ópticos, en el sistema de parabrisas que brinda visibilidad; electrónicos, como los controles de las modernas unidades; estructurales, etc. La lista continúa, pero es de exclusivo interés del presente proyecto el estudio de la carrocería como sistema estructural de las unidades de transporte de pasajeros.

Por lo tanto, los siguientes párrafos detallan los componentes principales de una unidad de transporte:

2.1.2.1 Componentes estructurales principales de una unidad de transporte de pasajeros.

En general, una unidad de transporte de pasajeros se compone de dos partes fundamentales:

- Chasis: constituye el bastidor que sirve de soporte físico para unidad, sobre el cual descansa la carrocería. Se emplea principalmente en vehículos de carga como camiones y buses, y también como refuerzo en autos de competición, provee la soporte necesario para montar los componentes que mueven la unidad y todos los sistemas mecánicos que la componen (motor, transmisión, diferencial, tanques de carburante, refrigerante, fluidos hidráulicos, etc.).

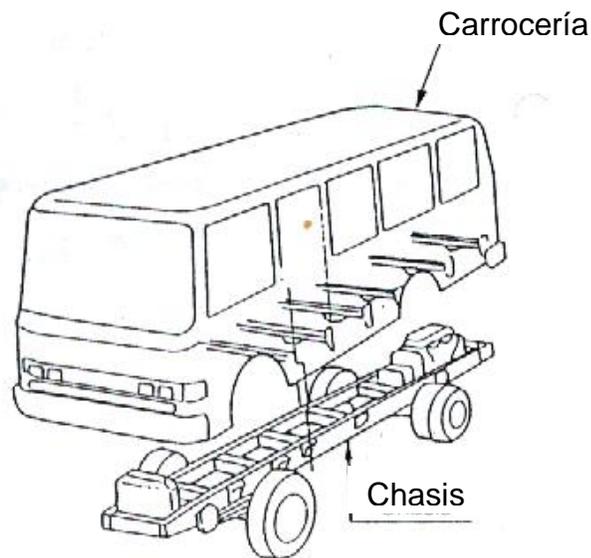


Fig. 2.14 Componentes de una unidad de transporte

- Carrocería: es el sistema destinado al transporte de pasajeros y carga, constituye tanto la parte física de la unidad de transporte en contacto con el pasajero como los sistemas de soporte.

En las siguientes páginas, dada la importancia que reviste para el presente proyecto, se profundizará el estudio de los componentes estructurales principales de las unidades de transporte.

2.1.3 EL BASTIDOR DEL CHASIS.

El bastidor del chasis es la estructura inferior del vehículo, al cual están acoplados la carrocería y los sistemas de potencia que dan movimiento a la unidad, así como demás componentes que requieren apoyo físico.

La misión fundamental del bastidor del chasis es la de ser el soporte físico de la carrocería y demás componentes que se monten en la unidad, conectar rígidamente la suspensión delantera y la trasera y al mismo tiempo ofrecer puntos de amarre para los diferentes sistemas del vehículo, así como proteger al conductor frente a una colisión. Por lo tanto, es el más esencial miembro sólido de una unidad de transporte.

2.1.3.1 Diseño del bastidor.

El diseño del bastidor del chasis se hace tomando en cuenta la carga que va a soportar, el tamaño final del vehículo y las condiciones de uso.

En la estructura del chasis lo determinante es la no deformación, es decir la *rigidez*. Dicha estructura del chasis debe ser lo suficientemente fuerte y rígida para soportar las cargas de la carrocería construida sobre la misma y por lo tanto asegurar un periodo de servicio de millones de kilómetros.

Del mismo modo, la rigidez es responsable de la buena adherencia de la unidad, lo que repercute en la facilidad de manejo⁶. Esto significa que la estructura del chasis debe ser lo suficientemente rígida para resistir flexión y torsión⁷. Dado que la mayoría de las cargas que actúan sobre el vehículo lo hacen en las

⁶ Ref. [4]

⁷ Una carrocería se comporta como una unidad, por lo tanto se ve afectada por la rigidez tanto del chasis como de la estructura

suspensiones frontal y posterior, la rigidez del chasis entre estos dos puntos es de vital importancia⁸. La expresión global de la rigidez es:

$$K = \frac{P}{\Delta} \quad 2.1$$

Donde:

P es la carga aplicada,

Δ es el desplazamiento.

La rigidez cumple con las siguientes proporcionalidades:

$$K \propto E.I \quad 2.2$$

$$K \propto E.A \quad 2.3$$

Siendo:

E, el módulo de elasticidad o modulo de Young

I, el momento de inercia,

A, el área de la sección.

De estas proporcionalidades se deduce que a mayor módulo de elasticidad, momento de inercia y/o área de sección, mayor será la rigidez.

2.1.3.2 Aspectos fundamentales en la rigidez del chasis.

Rigidez a flexión.

Se refiere a cuánto fleja el chasis cuando es cargado por el peso de los diferentes elementos que componen el vehículo, como son el motor, la transmisión, los tripulantes; soportado en los extremos y con la carga aplicada

⁸ Hay que hacer una diferenciación entre los términos **rigidez (en inglés stiffness)** que es la propiedad de la estructura de deformarse cuando una carga actúa, y **resistencia mecánica (en inglés strength)** que es la propiedad del material de soportar una carga antes de fallar.

en el cuerpo, como una viga simplemente apoyada. Ver fig. 2.15. La experiencia indica que las cargas en este sentido no causan deflexiones considerables, por lo tanto no es común tener problemas de deflexión en vehículos.⁹

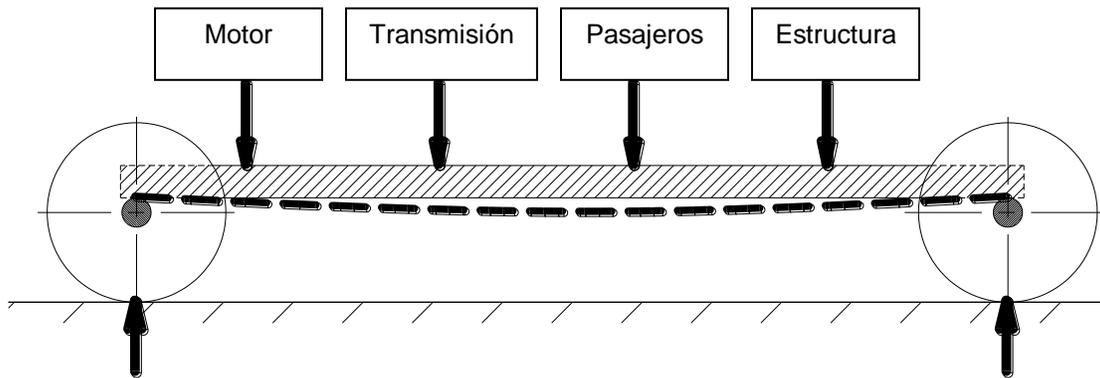


Fig. 2.15 Cargas actuantes en la deflexión del chasis.

Rigidez torsional.

Se refiere a cuanto se deforma el chasis debido a una carga asimétrica, por ejemplo, cuando una de las ruedas pasa por un bache y las demás no, una de las ruedas está a desnivel mientras en resto del vehículo está a nivel. Esta condición está también presente en cada curva, por lo cual es importante para la adherencia. Ver Fig. 2.16. El par torsor al que esté sometido el chasis proviene del conjunto de fuerzas de los amortiguadores.

⁹ Ref. [4]

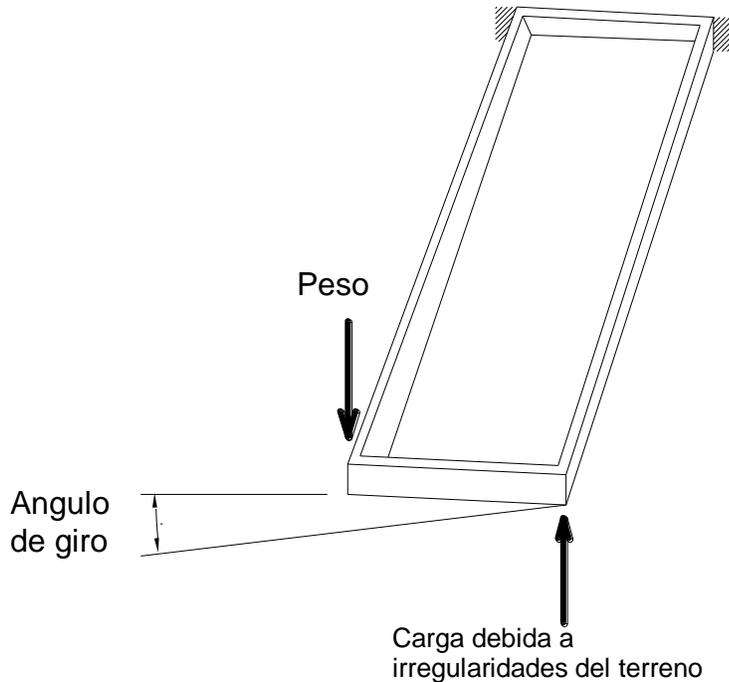


Fig. 2.16 Cargas actuantes en la torsión del chasis.

Un chasis suficientemente rígido para un tipo de carga (flexión) puede no tener la rigidez suficiente con otro tipo de carga actuante (torsión), por lo que la rigidez para flexión no asegura para torsión.

2.1.3.3 Tipos de bastidores.

Existe una gran variedad de tipos de chasis dependiendo de la aplicación, especialmente cuando a autos de competición, para mencionar algunos:

- Reforzados con miembros en X,
- Reforzados con cámara anti-vuelco, toda una estructura montada sobre la base del chasis para protección del piloto,
- Reforzados con placas de acero, las cuales que actúan como elementos estructurales de aporte de rigidez.

Para transporte pesado, el tipo más utilizado de chasis es el conocido como “Ladder” (escalera), constituido por dos perfiles estructurales conectados por dos o más miembros transversales, ver fig. 2.17.



Fig. 2.17 Chasis tipo “ladder” (escalera).

Su amplia aplicación se debe a la facilidad en su construcción y a su alta rigidez a flexión, que es la característica necesaria en vehículos de transporte de carga y de pasajeros. La desventaja de este tipo de chasis es su baja rigidez torsional, por lo que es necesario la utilización de una estructura que forme con el mismo una unidad completa que permita añadirle la rigidez torsional necesaria al conjunto.

2.1.3.4 Materiales del bastidor.

Debido a las elevadas solicitaciones de este componente, el material es de alta resistencia, sus esfuerzos máximos tanto a la ruptura¹⁰ (S_u) como a la fluencia (S_y) son elevados y sus componentes de aleación, aunque celosamente guardados por los fabricantes, contienen elementos que favorecen y aumentan dicha resistencia, como por ejemplo el manganeso (Mn), que aumenta la resistencia de los aceros al carbono.

¹⁰ Resistencia última, resistencia a la tracción

Para el bastidor del chasis es usual encontrar materiales con las resistencias detalladas a continuación, que son usadas comúnmente por los fabricantes:

Tabla 2.1 Resistencias de materiales comúnmente utilizados en la fabricación del bastidor del chasis

MATERIAL		
TIPO	Resistencia a la tracción (Su) [MPa]	Resistencia a la fluencia (Sy) [MPa]
Placa de acero laminada al calor	440	304
Placa de acero laminada al calor	540	392

Fuente: Manual para montaje de carrocerías, Hino Motors Ltd.

2.1.4 LA CARROCERÍA.

La carrocería es el sistema mecánico destinado al transporte de pasajeros y carga, constituyendo tanto la interfaz entre el viajero y el vehículo, es decir, la parte física de la unidad de transporte en contacto con el pasajero, como los sistemas de soporte estructural.

2.1.4.1 Partes de la carrocería

- Estructura: conocida también como superestructura¹¹ o estructura de esqueleto, es el sistema estático que provee resistencia, rigidez y soporte físico a la carrocería; está diseñada para absorber y dispersar la energía proveniente de pesos muertos, condiciones de manejo, irregularidades,

¹¹ De acuerdo al enfoque de análisis, véase 2.2.1.3 y Ref. [3]

impactos y colisiones mediante el redireccionamiento de la misma desde miembros expuestos hacia miembros menos solicitados a través de juntas rígidas, consiguiendo su disipación.

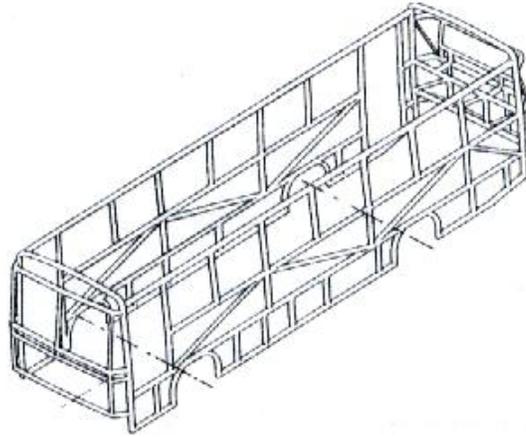


Fig. 2.18 Estructura de la carrocería

- Paneles externos o forros: superficie exterior en contacto con el ambiente, constituida por laminas metálicas o piezas de materiales compuestos, dan la forma distintiva a la unidad y son las responsables de la protección de la estructura contra la corrosión a través de capas de recubrimiento.

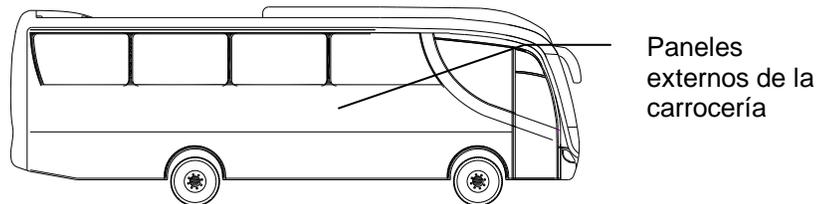


Fig. 2.19 Paneles externos de la carrocería

- Juntas: constituyen las interfaces de unión de elementos estructurales principalmente, de funcionamiento del vehículo y de confort para los pasajeros. Las principales uniones utilizadas son las uniones soldadas, empernadas y aglutinadas, dependiendo si se quiere juntar elementos estructurales, de confort o funcionamiento y de recubrimiento y visibilidad, respectivamente.

- Interior: conjunto de componentes emplazados dentro de la estructura que sirven de interfaz al pasajero diseñados y ubicados para su comodidad.
- Instrumentación: dispositivos dotados a la unidad para brindar el máximo de comodidad al cliente (pasajeros y conductor) tanto en el interior como en el exterior de la unidad.

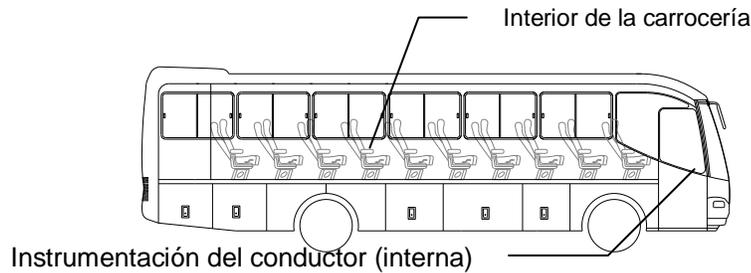


Fig. 2.20 Interior e instrumentación de carrocería

El presente proyecto se centrará de aquí en más en el estudio de la estructura de soporte de la carrocería.

2.1.4.2 Diseño de la carrocería.

El sistema de constituido por la carrocería metálica de una unidad de transporte, con todas sus partes, está sujeta a la influencia de agentes externos que modifican su comportamiento de acuerdo a la presencia e incidencia de los mismos.

Por esta razón es importante tomar en cuenta los aspectos de diseño más relevantes que inciden directamente en la calidad final del vehículo y en la satisfacción del cliente.

Consideraciones de diseño.

Al diseñar o construir una carrocería, se deben tomar en cuenta ciertas consideraciones en relación a la masa y dimensiones finales del vehículo:

- La masa total del vehículo debe encontrarse dentro de los parámetros de cada eje permisible o de la capacidad especificada del peso bruto del eje, la capacidad del neumático y la capacidad del peso bruto vehicular.
- La carga en el eje frontal debe satisfacer el radio mínimo del peso bruto vehicular para dicho eje.
- La masa vehicular debe estar distribuida uniformemente entre las ruedas izquierdas y derechas.
- La altura del centro de gravedad desde el suelo, luego del montaje de la carrocería, debe encontrarse dentro del límite especificado.
- El ancho total del vehículo debe estar dentro del límite especificado.
- Las dimensiones y masa de vehículo, cumplan las regulaciones locales.

Consideraciones respecto al centro de gravedad del vehículo.

Un centro de gravedad alto causa inestabilidad debido a que existe un gran brazo de giro desde el mismo a la superficie de la carretera. Fuerzas laterales en curvas pueden voltear el vehículo.

La altura del centro de gravedad de un vehículo desde el suelo, tiene el mayor impacto en la conducción y maniobrabilidad del vehículo. Por ello para conducir con seguridad, la altura del centro de gravedad no debe exceder el límite especificado.

El límite especificado para la altura del centro de gravedad representa la altura máxima del centro de gravedad que asegurará un ángulo de inclinación de 35° cuando el vehículo está descargado.

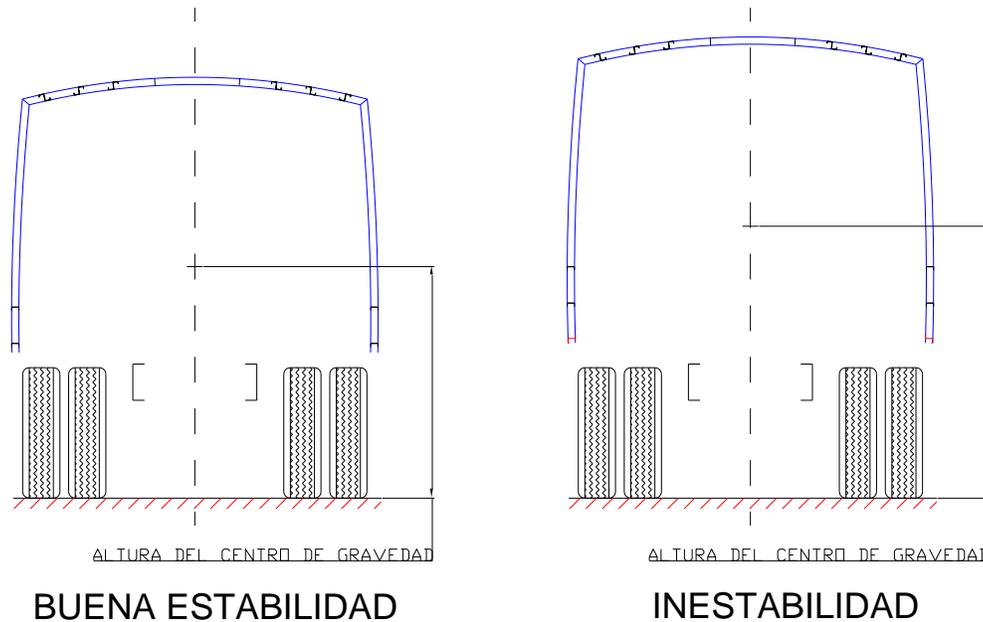


Fig. 2.21 Ubicación del centro de gravedad y su influencia en la estabilidad de la unidad.

Consideraciones respecto normativas nacionales vigentes.

Respecto a las últimas dos consideraciones de diseño, es importante que tanto las dimensiones como el peso, el equipamiento, la instrumentación y las medidas de seguridad se enmarquen dentro de regulaciones vigentes dentro de la legislación nacional. En nuestro país las regulaciones son controladas por el Instituto Ecuatoriano de Normalización mediante las normas:

- “Vehículos automotores. Determinación de la potencia neta del motor”
NTE INEN 1 155:84;

- “Vehículos automotores. Carrocerías metálicas. Requisitos.” NTE INEN 1 323:85;
- “Vehículos automotores. Bus urbano. Requisitos” NTE INEN 2 205:99;
- “Vehículos automotores. Carrocerías Metálicas para Buses Interprovinciales. Requisitos” NTE INEN 1668:88

Tabla 2.2 Aspectos de diseño de carrocerías de autobuses

DISEÑO DE LA CARROCERÍA	ESPECIFICACIONES	Peso bruto vehicular ¹² Peso bruto del eje Tipo de servicio y utilización (ciudad, interprovincial, etc)
	FUNCIONES	Dimensiones de la carrocería Operación de cada sistema Refrigeración y enfriamiento
	ESTABILIDAD	Distribución de la masa Altura del centro de gravedad Dimensiones de la carrocería Método de montaje de la carrocería
	RIGIDEZ	Peso bruto vehicular Peso bruto del eje Método de montaje de la carrocería Modificaciones del chasis Configuración de la estructura
	CONFORT AL VIAJAR	Ruidos internos Aislante del calor Método de montaje de la carrocería
	MANTENIBILIDAD	Accesibilidad Orificios de inspección
	SEGURIDAD	Prevención del fuego

¹² Para explicación de conceptos, véase el Glosario.

Fuente: Manual para montaje de carrocerías, Hino Motors Ltd.

2.1.4.3 Principios de diseño de la estructura.

Concepto de estructura de unidad de transporte interprovincial.

La estructura de una carrocería de autobús es el armazón que soporta los embates de las condiciones de manejo a las cuales es sometido, las cargas que se requieren transportar, y el estado de las vías. Las estructuras laterales, juntamente con el techo y el piso forman las unidades estructurales o pórticos que soportan y absorben las cargas externas. Al funcionar como elementos que soportan cargas combinadas es necesario que su diseño sea detallado y probado para garantizar un comportamiento adecuado en circunstancias reales de utilización.

La estructura de una carrocería es un sistema en el cual se conjuga distintos tipos de miembros estructurales de comportamientos disímiles. Las estructuras laterales (como se verá mas adelante) son armaduras, y la estructura del techo une las columnas de estas armaduras para formar pórticos.

En general, en el caso de las armaduras, se elige la figura del triángulo para resistir las deformaciones causadas por las fuerzas actuantes¹³. En el caso de los pórticos, se buscará que éstos formen unidades rígidas que distribuyan la carga externa uniformemente en toda la estructura.

Enunciados de los principios de diseño.

A continuación se enuncian los principios de diseño particulares que sirven de base para el diseño de carrocerías:

¹³ Ref. [8]

- La carrocería completa, la estructura y el bastidor del chasis forman una estructura integrada, es decir, el bastidor del chasis soporta solo una parte de toda la carga que recibirá el bus porque la misma se distribuye hacia todos los miembros de la estructura.
- Las fuerzas que actúan sobre la carrocería deben estar distribuidas tan suavemente como sea posible sobre todas las partes de la estructura, de tal manera que la estructura completa tenga su parte en el soporte de la carga (dispersión de las cargas).
- La rigidez de la estructura completa debe mantenerse tan alta como sea posible y ésta debe ser uniforme entre cada parte (distribución de la deformación y concentración de esfuerzo).
- Los paneles externos deben montarse sobre el esqueleto para contribuir a la rigidez de la estructura completa¹⁴ y no causar deformación permanente (encorvamiento) debido a cualquier deformación excesiva del esqueleto (uso eficiente de la rigidez a la tensión de los paneles externos).

En los párrafos siguientes se amplían los temas esbozados en los principios de diseño, dando importancia a los aspectos fundamentales que afectan el comportamiento de la estructura.

2.1.4.4 Relación entre las características de la carrocería del bus y el desempeño del vehículo.

¹⁴ Como se verá en 2.1.4.9, el aporte de los paneles exteriores a la resistencia global de la estructura no es comparable con la resistencia total que provee la estructura, por lo que no se han tomado en cuenta para el presente proyecto.

Las dimensiones y otras especificaciones de la carrocería del bus y equipos adicionales afectaran, el desempeño y funcionamiento del vehículo en diferentes maneras. Las principales causas involucradas se detallan a continuación:

Tabla 2.3 Factores de incidencia y características de la carrocería que influyen en el desempeño del vehículo

DESEMPEÑO DEL VEHICULO	CARACTERÍSTICAS RELACIONADAS A LA CARROCERÍA
<p>DESEMPEÑO EN LA CONDUCCION</p> <ul style="list-style-type: none"> - Desempeño de maniobrabilidad - Estabilidad de la manipulación - Desempeño de la conducción sobre caminos no pavimentados 	<ul style="list-style-type: none"> - Peso - Resistencia de la carrocería al aire - Rigidez del chasis - Rigidez de la estructura - Centro de gravedad - Distribución frontal y posterior del peso - Holgura mínima desde la tierra, ángulo de acercamiento, ángulo de alejamiento
<p>DURABILIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> - Resistencia, rigidez - Resistencia al óxido, corrosión 	<ul style="list-style-type: none"> - Estructura de la carrocería - Rigidez de las uniones entre cada una de las partes de la estructura - Rigidez de fijación de los paneles exteriores - Resistencia al agua, drenaje de agua - Especificaciones de pintado - Propiedades de los materiales de cada parte
<p>COMODIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> - Comodidad para los pasajeros - Vibración - Ruido en el compartimiento de los pasajeros 	<ul style="list-style-type: none"> - Espacio destinado al compartimiento de los pasajeros, partes salientes en este espacio, visibilidad, iluminación natural, luces, color, circulación de aire, ventilación, etc. - Frecuencia característica y modo de vibración de la carrocería, ruido y especificaciones de atenuación de la vibración de cada parte
<p>SEGURIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> - Seguridad de los pasajeros y peatones - Prevención de 	<ul style="list-style-type: none"> - Facilidad para la subida y bajada de los pasajeros, facilidad de movilización interna de los pasajeros, seguridad del equipo interno y externo. - Protección de los mazos de cables, tuberías, etc.

accidentes y de incendios	
---------------------------	--

Fuente: Manual para montaje de carrocerías, Hino Motors Ltd.

2.1.4.5 Tipos de carrocerías.

Dependiendo del *método de unión de la carrocería al chasis*, puede ser:

- Carrocería independiente: cuando la instalación se efectúa empernando la carrocería al chasis, pudiendo ser desmontada cuando sea necesario. Esta tecnología de unión no se utiliza en la actualidad porque las uniones empernadas no aseguran mantener la carrocería como una unidad rígida.
- Autoportante: cuando la instalación se efectúa mediante unión soldada entre la carrocería y el chasis, no es desmontable y asegura el comportamiento del vehículo como una unidad rígida.

Según los *materiales empleados en su construcción*, pueden ser:

- Monocasco: cuando la diferencia entre el chasis y la carrocería es difusa, ya que el chasis forma parte de la carrocería.
- Tubular: son los que las se emplean en la construcción de unidades de transporte por la facilidad de adquirir materiales y por la factibilidad de construcción. En este proyecto se analizarán este tipo de estructuras.

El presente proyecto se centrará en el estudio de carrocerías autoportantes tubulares para unidades de transporte de pasajeros.

2.1.4.5.1 Clasificación de las carrocerías de bus, por su estructura¹⁵.

Debido a la importancia que reviste para el presente proyecto, se realizará un análisis más detenido de las carrocerías atendiendo el tipo de estructura que las constituya.

¹⁵ Ref. [5]

Las carrocerías de buses pueden normalmente ser clasificadas de acuerdo a cuál parte de la estructura soporta la fuerza externa desde la superficie de rodamiento, mientras el vehículo está detenido o en operación.

Estructura de refuerzo de recubrimiento externo

Los paneles exteriores son los principales elementos de la resistencia de la estructura de la carrocería. El tamaño de las aberturas en los paneles exteriores debe ser restringido a fin de asegurar la rigidez suficiente. Por lo tanto, el tamaño de las ventanas o puertas es limitado. Una gran cantidad de remaches usados en este tipo de construcción, desmerece la apariencia del vehículo.

La industria ecuatoriana, en los primeros pasos de su incursión en la industria carrocera, adoptó esta tecnología para la construcción de unidades de transporte. Cabe señalar que la tecnología de refuerzo de recubrimiento externo no tiene cabida en el mercado actual por su desventaja en cuanto a apariencia¹⁶.

¹⁶ La apariencia de este tipo de carrocerías se relaciona con modelos antiguos, ya que su auge en el Ecuador tuvo lugar en los 70's y 80's. En la actualidad no se construyen este tipo de carrocerías.

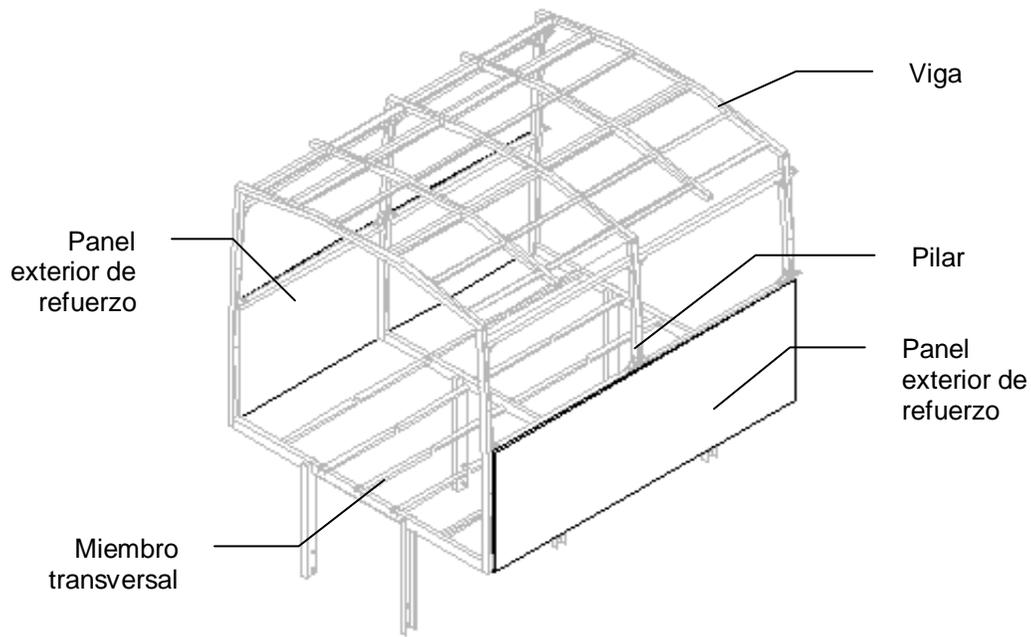


Fig. 2.22 Estructura de refuerzo de recubrimiento externo.

Estructura de refuerzo de recubrimiento interno

Los paneles interiores son los principales elementos de la resistencia de la estructura de la carrocería. Debido a que los elementos de resistencia están en el interior de la carrocería, el exterior puede ser cubierto con paneles decorativos exteriores, dando a este tipo de carrocería una ventaja en su apariencia. Con esta tecnología, los paneles interiores deben mantenerse para asegurar la rigidez suficiente, por lo que, este tipo de carrocería tiende a ser más pesada que las otras, lo que constituye una desventaja competitiva.

Por este motivo, las ensambladoras no emplean en general éste método por considerar que su producto no tendrá acogida suficiente.

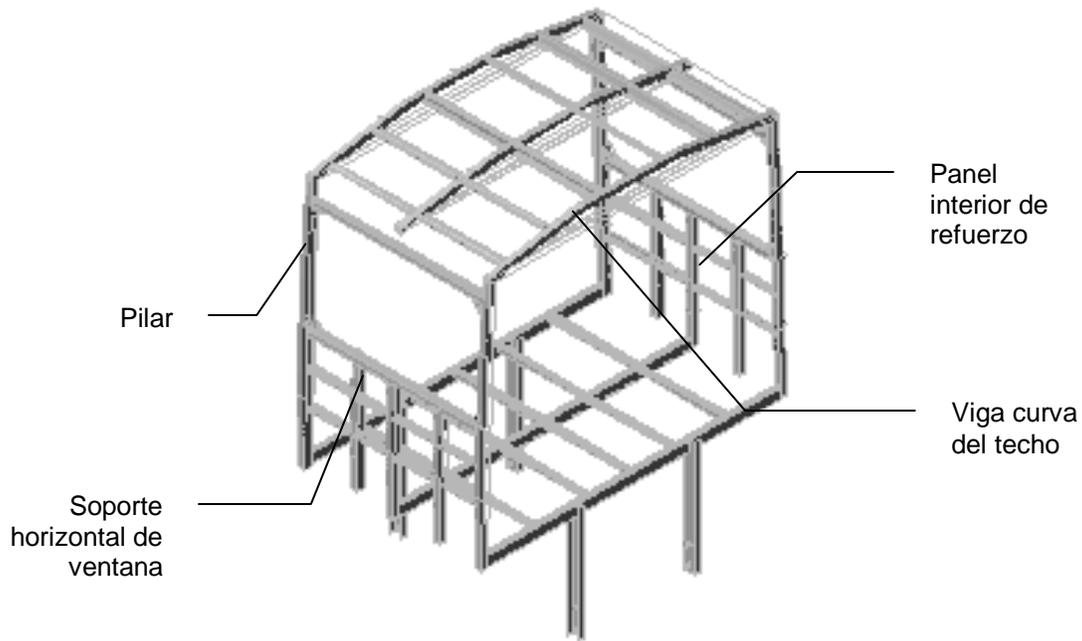


Fig. 2.23 Estructura de refuerzo de recubrimiento interno.

Estructura de esqueleto de refuerzo

La resistencia y rigidez se deben a una integración entre el bastidor del chasis y la estructura de la carrocería, con el principio de diseño analizado en 2.1.4.3 de que la carrocería completa y el bastidor del chasis forman una estructura integrada, es decir, el bastidor del chasis soporta solo una parte de toda la carga que recibirá el bus porque la misma se distribuye hacia todos los miembros de la estructura.

Este tipo de carrocería ofrece ventajas considerables por la libertad en el diseño y la mejora en la apariencia de la carrocería: La apariencia es limpia, sin remaches en los paneles exteriores y las ventanas y puertas pueden hacerse más grandes.

En la actualidad, ésta configuración es la más utilizada en la construcción de unidades de transporte por las ventajas antes descritas y por la disponibilidad y calidad de materiales en el mercado.

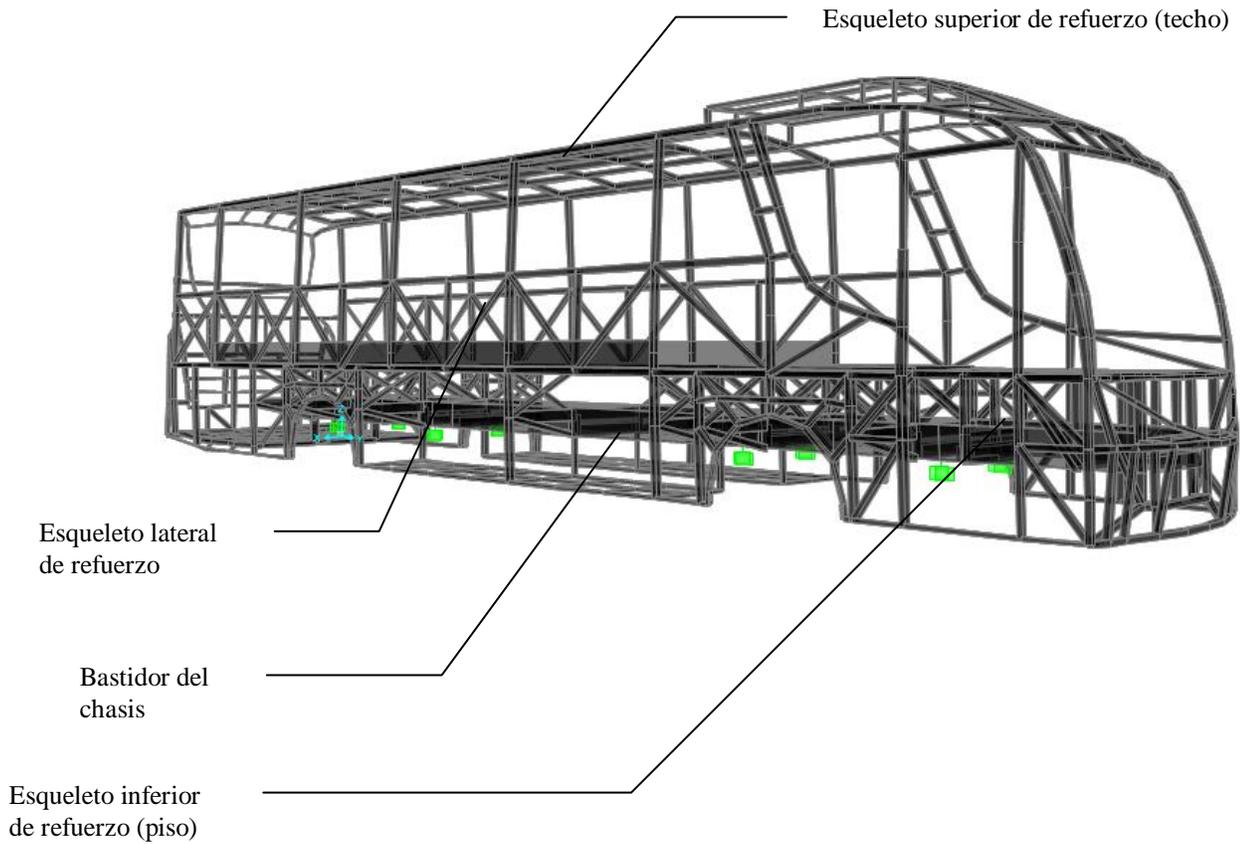


Fig. 2.24 Estructura de esqueleto de refuerzo

2.1.4.6 Partes de la estructura de esqueleto de refuerzo.

Los principales componentes de una estructura de esqueleto de refuerzo son:

- Laterales: brindan soporte estructural lateral formando el cuerpo de la carrocería. Comprenden espacios para ventanas y puertas y forman entre sí (derecha e izquierda) arcos uniformes conocidos como “pórticos”, que son las unidades estructurales fundamentales de soporte de la estructura.

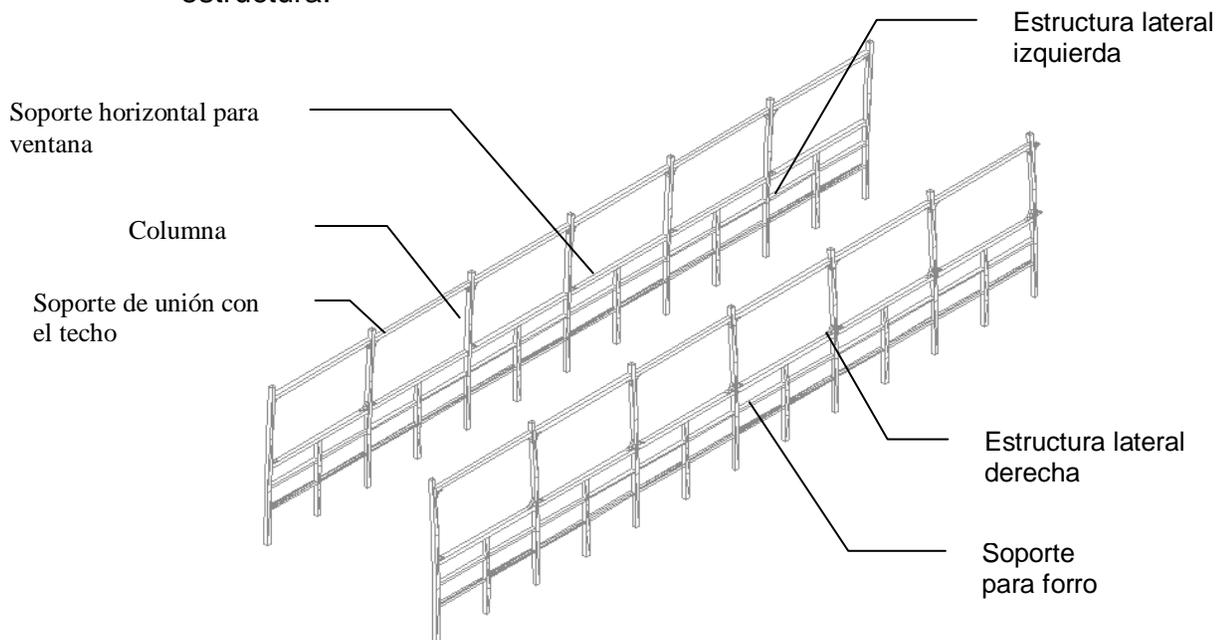


Fig. 2.25 Estructuras laterales

- Piso: constituye la estructura de soporte tanto de los laterales como de las estructuras frontal y posterior y sobre el cual se colocan todos los elementos del interior de la carrocería; dependiendo de la aplicación se encuentra cerca del bastidor o es levantado para dar cabida a compartimientos en su parte interior,

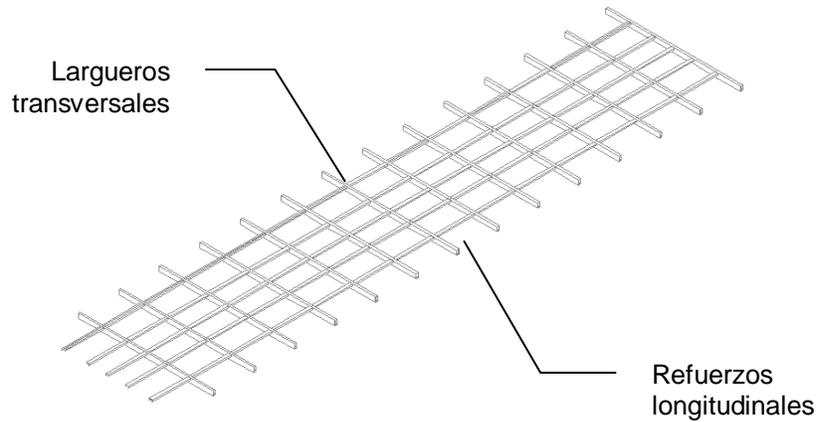


Fig. 2.26 Estructura del piso

- Techo: es la estructura de unión de los laterales y forma entre ellos unidades rígidas o pórticos; su forma es diseñada para evitar que lluvia, ceniza y polvo se acumule en su superficie y dependiendo de la aplicación puede ser reforzada para transportar carga en general.

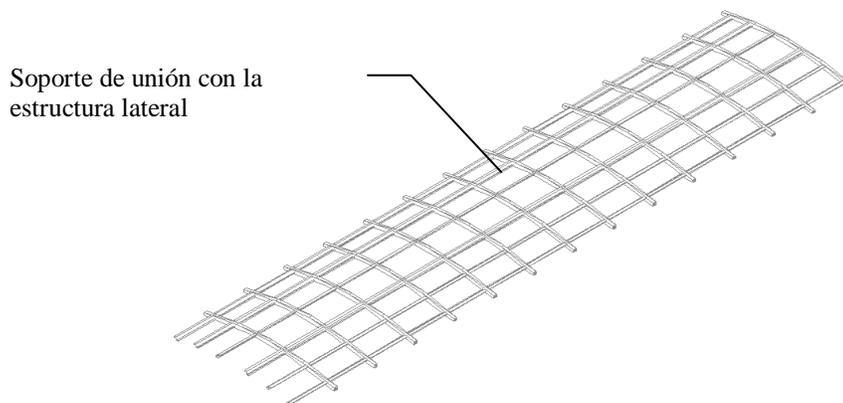
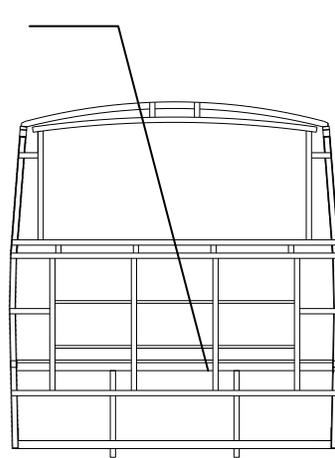


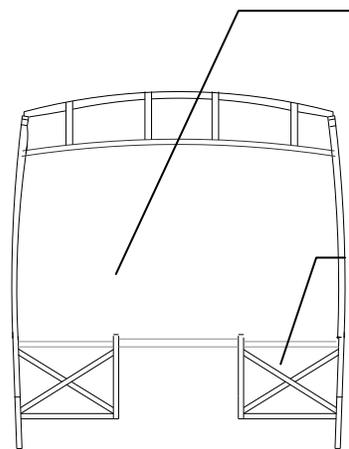
Fig. 2.27 Estructura del techo

- Frontal y posterior: son estructuras de soporte, fijación y unión de los elementos de la carrocería, dándoles sus posiciones adecuadas; sobre ellas descansan los paneles frontal y posterior de la carrocería; ofrecen resistencia ante colisiones.

Estructura de soporte de paneles posteriores



Parabrisas delantero



Estructura de refuerzo frontal

Fig. 2.28 Estructuras posterior y frontal (respectivamente)

2.1.4.7 Estudio de las fuerzas que actúan sobre la carrocería.

Cuando el bus está detenido o en operación, está sujeto a una variedad de fuerzas. Para su estudio y análisis, se seguirán dos criterios para definir y caracterizar las mismas:

- Criterio de efectos producidos.
- Criterio de magnitud y dirección (fuerzas dinámicas).

Es claro que ambos criterios coincidirán en ciertas definiciones, pero es conveniente dicha separación para caracterizar las cargas y determinar las zonas más vulnerables.

Criterio de efectos producidos.

En función de los efectos que una carga produce en su acción sobre la estructura de un bus de pasajeros y su frecuencia, las fuerzas más importantes, son las siguientes:

2.1.4.7.1 Cargas de flexión.

Son las interacciones que tienden a flejar (combar) la carrocería, actuando longitudinalmente sobre el bastidor del chasis en dirección vertical hacia el centro de la tierra.

Se producen por la acción del peso de la carga útil sobre la estructura y las fuerzas de reacción provenientes de la superficie de rodamiento.

Fuerzas significativas de flexión actúan sobre el bus como un conjunto, aún cuando está detenido. La deformación es especialmente grande alrededor de la zona de pasajeros y de los compartimientos para los neumáticos y va progresivamente aumentando la deformación por flexión, dando como resultado una concentración del esfuerzo en las juntas (uniones) sobre cualquier extremo de los pilares tensionados de las ventanas laterales por fuerzas de flexión.

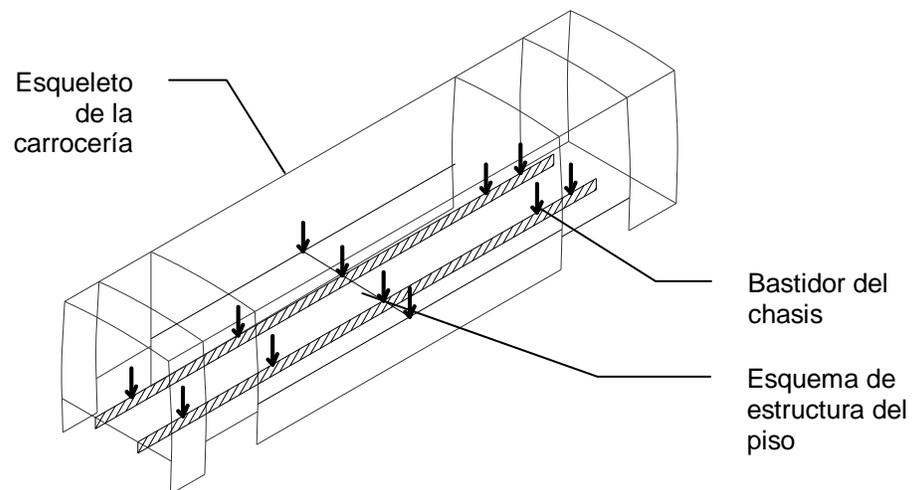


Fig. 2.29 Comportamiento de las cargas flexionantes.

2.1.4.7.2 Cargas torsionales.

Son las fuerzas que tratan de torcer la carrocería, y que se presentan a los costados de la misma en direcciones contrarias, produciendo un momento torsor.

Resultan de las interacciones alternativas derecha-izquierda de la carrocería, causadas por reacciones desde la superficie de rodamiento (baches e irregularidades) y el desbalance del peso de la carga útil en las direcciones izquierda y derecha.

Cuando el vehículo está en operación, la fuerza torsional, resultante de las fuerzas de reacción desde la superficie del rodamiento, que actúan alternativamente sobre los lados de la carrocería del bus y el incremento de la carga debido a vibración, actúan sobre el bus repetidamente. Estas cargas conducen a extremas deformaciones y concentración de esfuerzo en todas las partes de la estructura de la carrocería, especialmente en las partes en donde hay rigidez insuficiente.

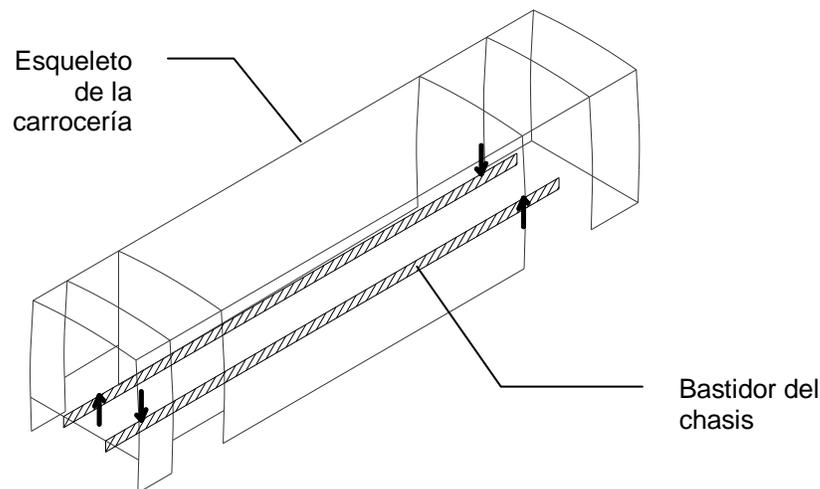


Fig. 2.30 Comportamiento de las cargas torsionales.

2.1.4.7.3 Cargas laterales.

Se producen durante giros rápidos donde la unidad está sometida a una aceleración centrífuga que permite seguir la trayectoria de la curva. A consecuencia de ello, la estructura estará sometida a una fuerza centrífuga que cargará los paneles y columnas de la misma y los ocupantes constatarán los efectos de una fuerza centrípeta que tiene tendencia a sacarlos de su ubicación.

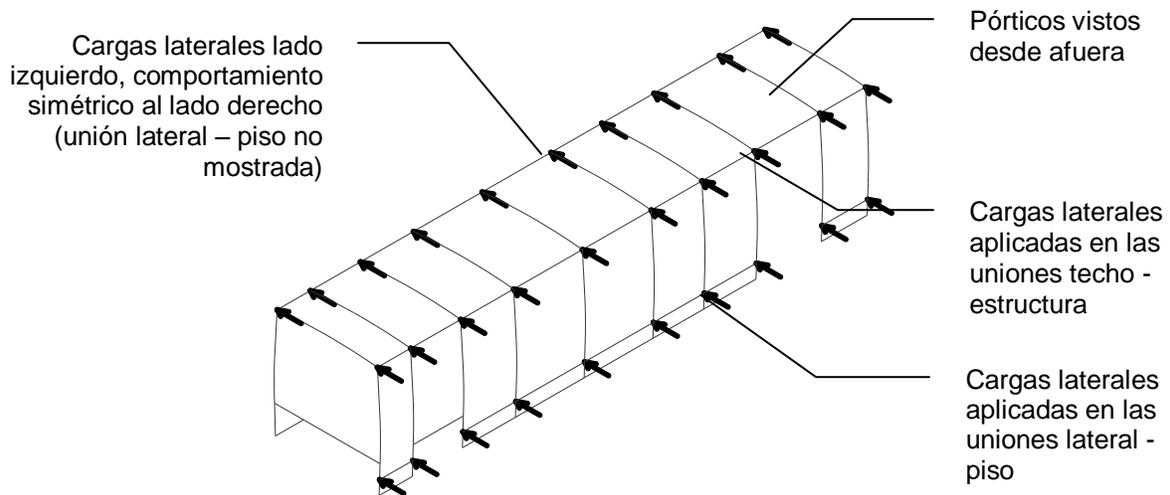


Fig. 2.31 Comportamiento de las cargas laterales. La figura muestra la parte externa de la estructura, no se incluye el interior

2.1.4.7.4 Cargas de frenado.

Se presentan cuando el vehículo es sometido a una aceleración negativa (sentido contrario al movimiento) dando como resultado la presencia de este tipo de fuerzas que actúan empujando la estructura en el sentido del movimiento original debido a la inercia de la unidad. Del mismo modo, cuando el vehículo experimenta aceleraciones en el mismo sentido del movimiento, se presentan cargas hacia atrás que se oponen al mismo, por el motivo descrito.

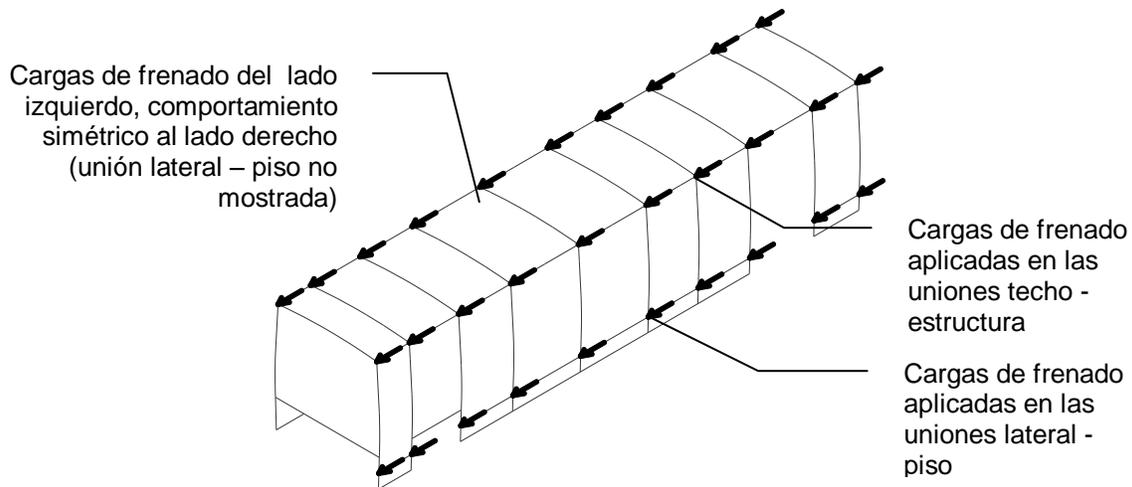


Fig. 2.32 Comportamiento de las cargas de frenado. La figura muestra la parte externa de la estructura, no se incluye el interior

Criterio de magnitud y dirección (fuerzas dinámicas).

Al analizar y diseñar una estructura para carrocería de bus es importante comprender que tiene que resistir todas las fuerzas dinámicas que se generen durante la marcha del vehículo¹⁷.

2.1.4.7.5 Fuerzas verticales¹⁸.

Origen.

Las fuerzas dinámicas verticales se forman a causa de las aceleraciones debidas a los movimientos de la suspensión. También al tomar las curvas aparecen fuerzas verticales que actúan sobre los costados de la carrocería y vigas sobresalientes.

Absorción y propagación en la parte posterior de la estructura.

¹⁷ Ref. [7]

¹⁸ Ref. [45]

Las fuerzas verticales en la parte posterior de la carrocería son absorbidas por el eje trasero a través las ballestas de la suspensión. Se propagan desde las fijaciones posteriores de la suspensión y desde el voladizo de la carrocería, pasando por los largueros del piso, saliendo y subiendo por los costados de la carrocería y siguiendo hacia adelante a las vigas bajo las cuales están montadas las ballestas del eje trasero.

Es claro que las fuerzas han de pasar también desde el costado de la carrocería a través de los largueros del piso para llegar a la suspensión, ballesta y amortiguador.

Como caso extremo pueden aparecer torsiones, por ejemplo, al conducir por malos caminos si la rueda delantera de un lado y la posterior del otro lado son comprimidas al mismo tiempo contra el tope de las ballestas.

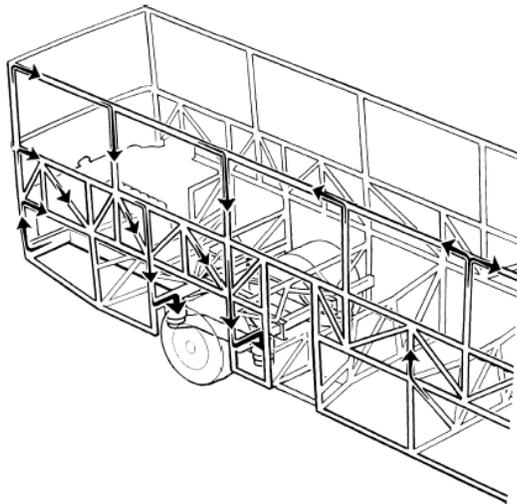


Fig. 2.33 Fuerzas verticales en la parte posterior de la estructura

Absorción y propagación de fuerzas verticales en la parte delantera de la estructura.

Parecidas fuerzas ascendentes y descendentes procedentes del voladizo delantero llegan a los amortiguadores y ballestas del eje delantero. Este voladizo no es tan grande como el posterior, y tiene menos peso.

No obstante, si hay una abertura para puerta se producen concentraciones de esfuerzos. Como una gran parte de la carga vertical ha de pasar alrededor (principalmente encima) de la puerta, esta zona queda expuesta a grandes esfuerzos.

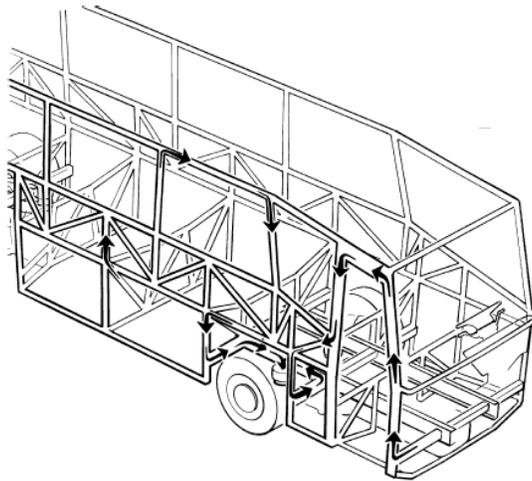


Fig. 2.34 Fuerzas verticales en la parte delantera de la estructura

Absorción y propagación de fuerzas verticales en la parte central de la estructura.

El peso de los pasajeros y del equipaje se concentra en la sección entre ejes. También aquí las fuerzas siguen el camino más rígido por los costados de la carrocería a los amortiguadores y ballestas de la suspensión.

2.1.4.7.6 Fuerzas longitudinales.

Origen.

Las fuerzas que generan los pasajeros y el peso del equipaje al frenar el vehículo han de transmitirse a través del piso y de los soportes de éste a los largueros para descender seguidamente a las barras estabilizadoras.

Absorción y propagación.

Las fuerzas longitudinales aparecen normalmente al frenar el vehículo pero pueden formarse también al pasar sobre baches del pavimento. *Al frenar el vehículo, el peso se transmite a los costados de la carrocería donde es absorbido por las estructuras laterales.* Las fuerzas se reúnen en la parte inferior de los costados de la carrocería propagándose a través del piso o soportes del mismo al bastidor y a través de las barras estabilizadoras a las ruedas.

En unidades de transporte interprovincial, se da al maletero forma de armazón. Su acoplamiento a las partes delantera y trasera del chasis es una parte vital del armazón total de la carrocería y es muy importante tener en cuenta las fuerzas que se originan en esta zona. Las fuerzas actuantes son longitudinales y como todas estas fuerzas acaban concentrándose en las barras estabilizadoras.

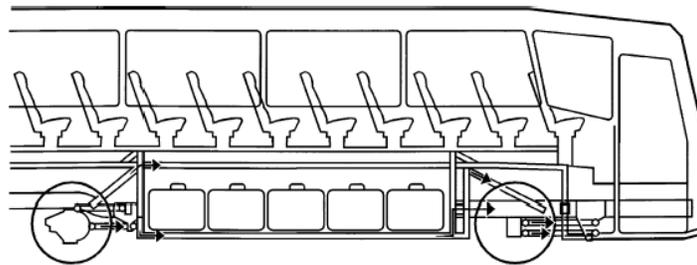


Fig. 2.35 Fuerzas longitudinales

2.1.4.7.7 Fuerzas transversales.

Origen.

Las fuerzas transversales aparecen al tomar curvas y al cambiar de carril. La sección del techo es empujada hacia fuera siendo frenado este movimiento por la parte inferior de la carrocería y por las ruedas. La carrocería se ve sometida a

fuerzas transversales y vista desde delante parece asumir la forma de un romboide.

Al tomar curvas se originan fuerzas transversales que tienden a flexionar la carrocería alrededor de las fijaciones de los ejes. Estas fuerzas son absorbidas principalmente por el piso y en cierta medida por el techo. Es importante que tanto el suelo del maletero como el del compartimiento de pasajeros tengan una suficiente rigidez en sentido transversal.

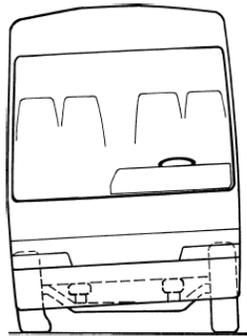


Fig. 2.36 Comportamiento del vehículo al tomar una curva

Absorción y propagación.

Todo ello origina *esfuerzos en las esquinas de unión entre las estructuras laterales y las vigas transversales del techo. Fuerzas equivalentes aparecen en la parte inferior de las estructuras laterales, en la unión con vigas sobresalientes del piso, donde actúan como "fuerzas de flexión transversales"*. La estructura posterior refuerza la parte trasera de la carrocería, y la estructura delantera con el parabrisas, la parte delantera.

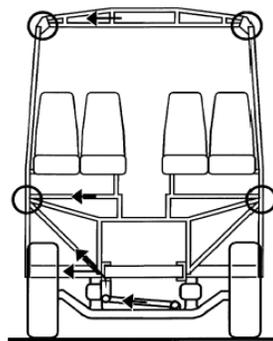


Fig. 2.37 Fuerzas transversales

Todas las fuerzas transversales originadas por una carrocería cargada con pasajeros y equipaje constituyen *fuerzas laterales* en el piso desde donde son transmitidas a las barras estabilizadoras, donde son absorbidas.

2.1.4.8 Distribución de la carga sobre los componentes de la carrocería¹⁹.

Cada elemento de la carrocería soporta una componente de las cargas aplicadas sobre la estructura debido a la naturaleza de las cargas y a su origen.

Así, las cargas de flexión actuarán en mayor medida en diferentes miembros y secciones de la estructura que las cargas de torsión debido a su naturaleza de flejar la estructura.

A continuación se analizará la incidencia de las cargas sobre la estructura y sus partes principales, y un análisis más detenido mostrará el comportamiento de cada parte de la estructura ante la aplicación de determinada combinación de cargas.

Distribución de la carga de flexión sobre los componentes de la carrocería.

De acuerdo a investigaciones exhaustivas y a la experiencia acumulada a través de los años²⁰, es posible estimar la proporción de carga que soporta cada elemento de una carrocería de esqueleto de refuerzo de una unidad de transporte de pasajeros.

¹⁹ Ref. [5]

²⁰ Ref. [5]

Esta estimación proporciona una referencia del comportamiento de la estructura y brinda las pautas para el análisis y diseño de la misma porque afina el criterio del ingeniero de las zonas más propensas a falla durante el funcionamiento. La gráfica siguiente muestra comparativamente la proporción de carga a flexión que soporta cada elemento de la carrocería:

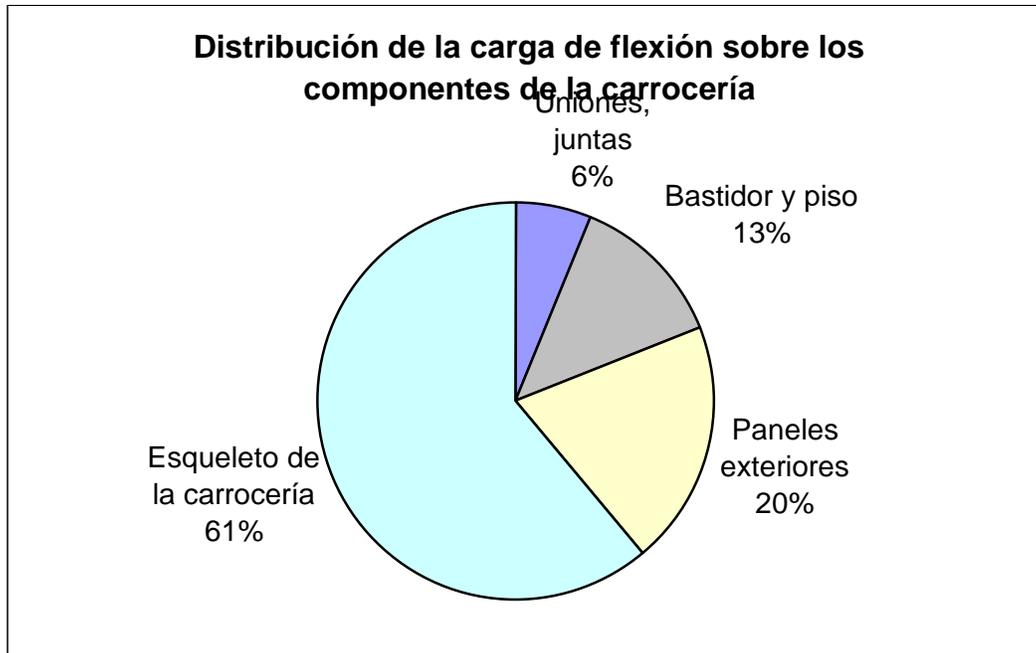


Fig. 2.38 Distribución de la carga de flexión sobre los componentes de la carrocería

La mayor cantidad de carga es soportada por el conjunto bastidor – esqueleto de la carrocería, lo que afianza el principio de diseño de crear un dispositivo rígido que actúe como una unidad estructural.

Los paneles exteriores soportan proporcionalmente una buena parte de la carga, debido a que generalmente se los tensa en el montaje para así conseguir mejor apariencia. Al ser medios de unión de miembros estructurales absorberán parte de la carga soportada por los mismos.

Las uniones y juntas soportan un 6% del total de la carga, por lo que reviste importancia su análisis y construcción adecuados.

Distribución de la carga de flexión sobre los componentes de la estructura.

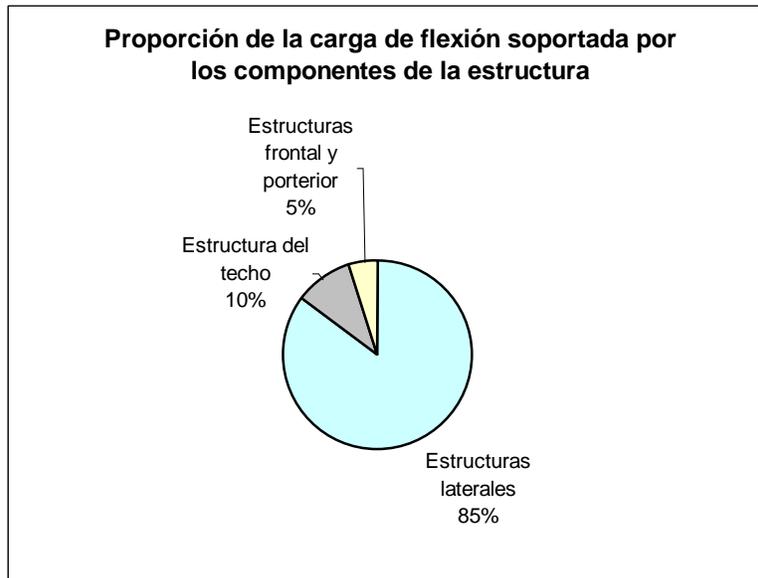


Fig. 2.39 Distribución de la carga de flexión sobre los componentes de la estructura.

La gráfica muestra que la mayor parte de carga flexionante se transmite desde el bastidor (que incluye la estructura del piso de la carrocería) a las estructuras laterales, lo que evidencia la gran importancia de analizar su comportamiento y poner cuidado en su diseño, evitando concentradores de esfuerzo y zonas poco rígidas.

El techo soporta un porcentaje de carga relativamente bajo, lo que evidencia el hecho de que en flexión el techo no aporta mayoritariamente a la rigidez de la estructura.

Del mismo modo las estructuras frontal y posterior soportan proporciones relativamente pequeñas de dicha carga, por lo que antes de elementos rigidizadores se consideran elementos conectores que tienen la misión de contribuir al soporte de la estructura.

Distribución de la carga de flexión sobre los paneles de la estructura.

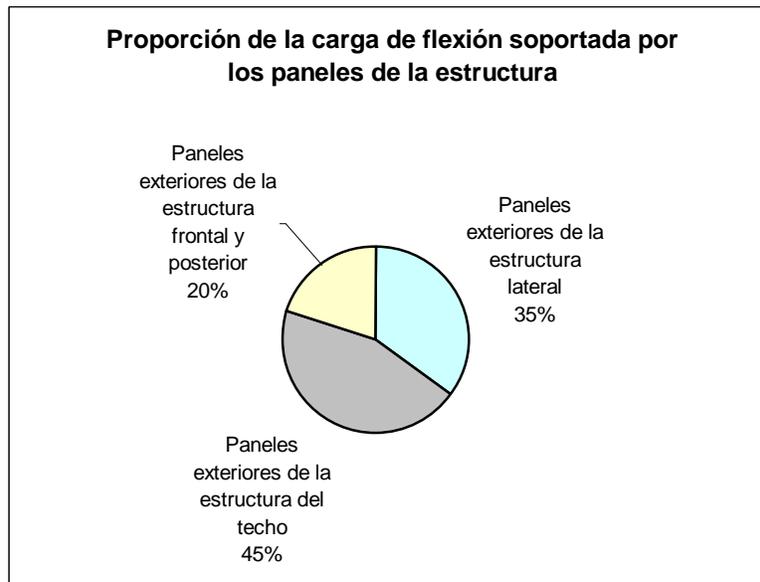


Fig. 2.40 Distribución de la carga de flexión sobre los paneles de la estructura

Se evidencia uniformidad en la incidencia de la carga sobre los paneles de recubrimiento de la estructura a la flexión, lo cual es admisible partiendo de la premisa de que toda la estructura es recubierta por los mismos, por lo tanto todos los paneles tendrán componentes similares de las cargas por su interrelación y por estar unidos a la estructura.

Analizando con más detalle, los paneles de la estructura del techo sufren la incidencia de la carga flexionante en tanto mayor proporción porque, al estar las estructuras laterales sometidas a la mayor carga, tienden a producir desplazamientos y ligeras deformaciones que desembocan en cambios mínimos en sus posiciones relativas, lo que es absorbido por los paneles por se los medios de unión de los miembros estructurales

Distribución de la carga de torsión sobre los componentes de la carrocería

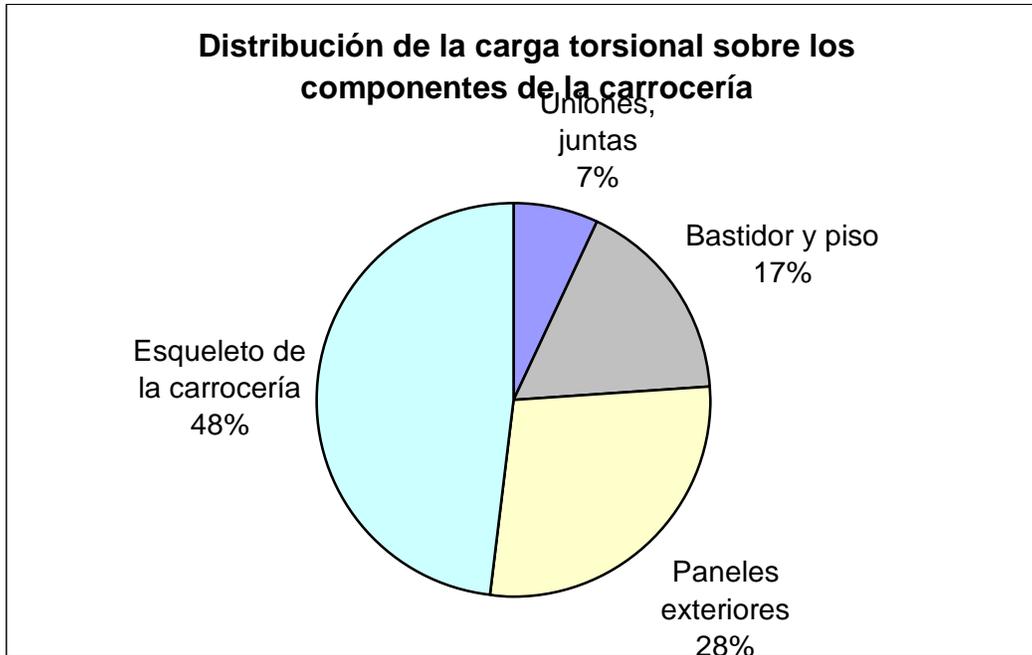


Fig. 2.41 Distribución de la carga de torsión sobre los componentes de la carrocería

La proporción absorbida por la estructura de esqueleto de la carrocería disminuye 13 puntos porcentuales, lo cual no constituye un drástico cambio en el comportamiento de la estructura. Sin embargo, debido a que la naturaleza de las cargas es distinta, es importante considerar que el porcentaje de carga soportada por el esqueleto de la estructura sigue siendo del 50% aproximadamente, lo que corrobora la importancia del análisis y diseño de la estructura, porque constituye en conjunto con el bastidor, el soporte estructural fundamental del vehículo.

El resto de componentes de la carrocería aumentan su porcentaje de soporte de carga, pero es evidente que el comportamiento es muy similar al observado con carga de flexión.

Es importante considerar el incremento de acción de los paneles de la carrocería, que contribuyen a la rigidez de la estructura absorbiendo una proporción considerable de carga.

Distribución de la carga de torsión sobre los componentes de la estructura.

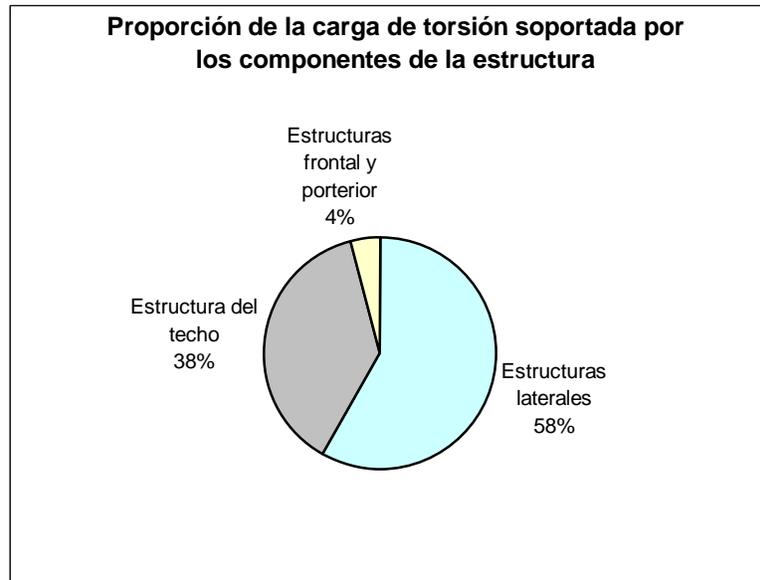


Fig. 2.42 Distribución de la carga de torsión sobre los componentes de la estructura.

Al igual que los efectos de la carga flexionante, la carga de torsión es absorbida en su mayoría (58%) por las estructuras laterales. Cabe señalar que su efecto sobre ellas disminuye por la naturaleza misma de la carga, que tiende a torcer la estructura. Aun así, es evidente que las estructuras laterales siguen siendo fundamentales para el soporte estructural.

Como se anotó en el párrafo anterior, la estructura del techo soporta una proporción mayor de carga torsional que flectora, debido a la naturaleza misma de la primera; debido a ello aporta con una proporción mayor a la rigidez torsional de la estructura y reviste importancia su diseño para lograr rigidez en conjunto.

El aporte a la rigidez del conjunto de las estructuras frontal y posterior se mantiene, el comportamiento de las mismas sigue siendo de elementos de unión y soporte.

Distribución de la carga de torsión sobre los paneles de la estructura.

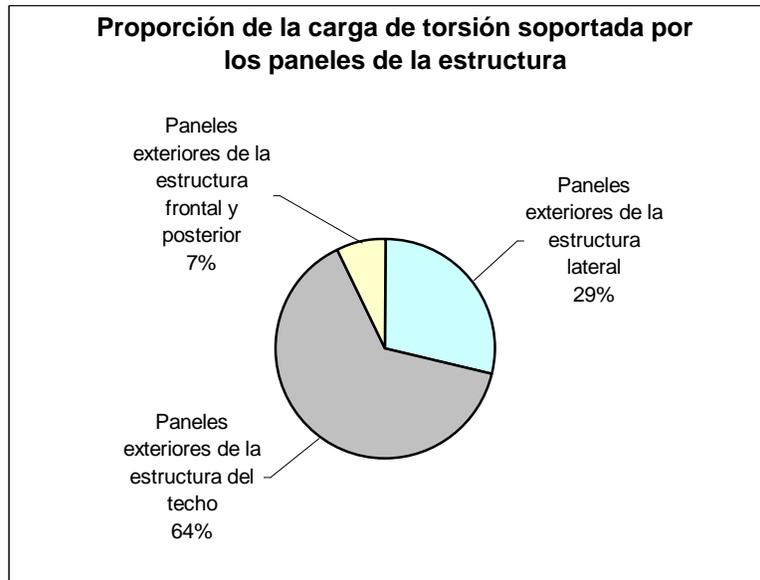


Fig. 2.43 Distribución de la carga de torsión sobre los paneles de la estructura

Al igual que los componentes de la estructura del techo, los paneles que lo recubren soportan una mayor proporción de carga de torsión, lo que es coherente con la naturaleza de la carga y con la respuesta de la estructura a la misma.

Los paneles laterales mantienen la tendencia de soporte al igual que la carga flectora, y los paneles frontal y posterior bajan su aporte de resistencia.

Análisis.

Del análisis de las gráficas se deduce:

- La parte mas grande de las fuerzas de flexionantes son soportadas por la estructura de esqueleto integral de la carrocería (incluyendo el bastidor del chasis).
- El bastidor del chasis y las estructuras del techo (incluyendo el esqueleto y los paneles exteriores) soportan la parte más grande de la carga torsional.

2.1.4.9 Disposición de los miembros en la estructura.

Disposición de los elementos horizontales.

Los miembros horizontales longitudinales principales de la estructura lateral de la carrocería (rieles superiores e inferiores de las ventanas, rieles de margen, etc.) deben ser de un tubo de sección cuadrada de largo sencillo. Donde se cruzan los miembros horizontales y verticales, los miembros horizontales deben -como una regla- tener prioridad (disposición prioritaria de los miembros horizontales)²¹.

Un miembro compuesto de un tubo sencillo de sección cuadrada es más rígido y más estable que el miembro hecho de una cantidad de tubos de sección cuadrada soldados entre si. Esto significa que la disposición prioritaria de los miembros horizontales tiende a transmitir cargas a lo largo del vehículo y hace significativas contribuciones a la distribución igual o a la dispersión o deformación y al esfuerzo.

²¹ Ref. [5]

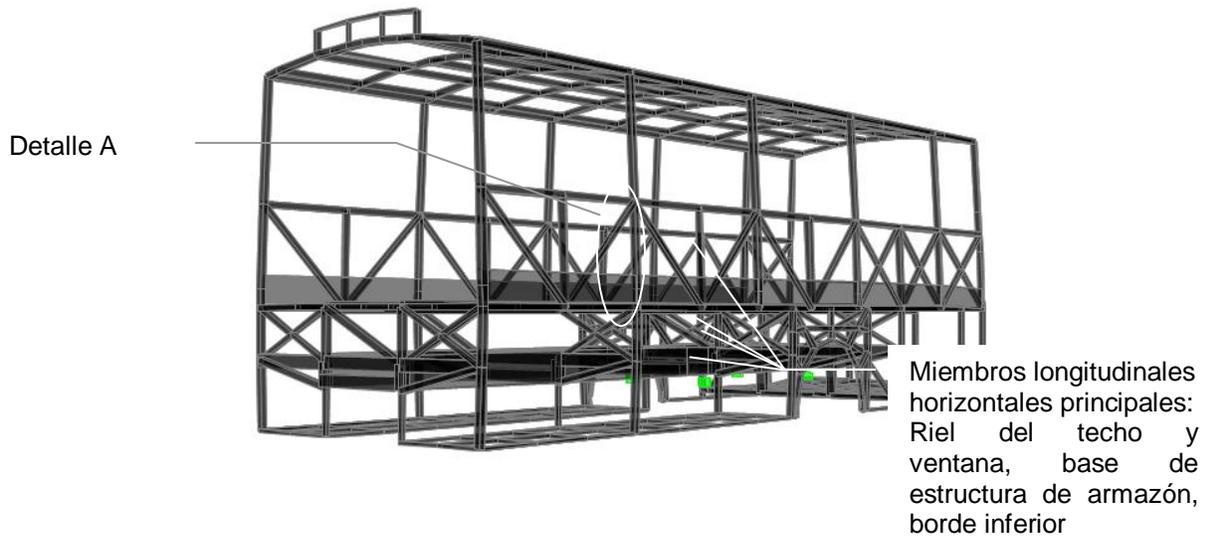


Fig. 2.44 Disposición de los miembros verticales y horizontales en la estructura

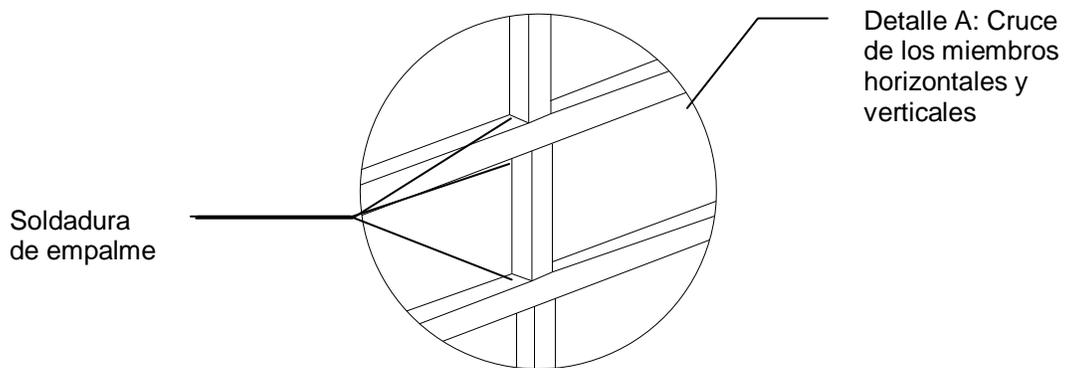


Fig. 2.45 Detalle de la disposición de los miembros verticales y horizontales en la estructura

Disposición de los elementos verticales.

Los elementos verticales principales de la estructura deben ser colocados en el mismo plano lateral que los largueros transversales o estabilizadores del piso y las vigas del techo, de tal manera que pueda formar un grupo de arcos o "porticos". Su papel es de:

- Transmitir la fuerza de reacción desde la superficie de rodamiento y la carga útil del esqueleto de la carrocería a través de los miembros transversales, y
- Actuar literalmente como arcos, uniendo todos los miembros longitudinales horizontales principales del esqueleto e incrementando la rigidez al combamiento total y torsional de la carrocería.

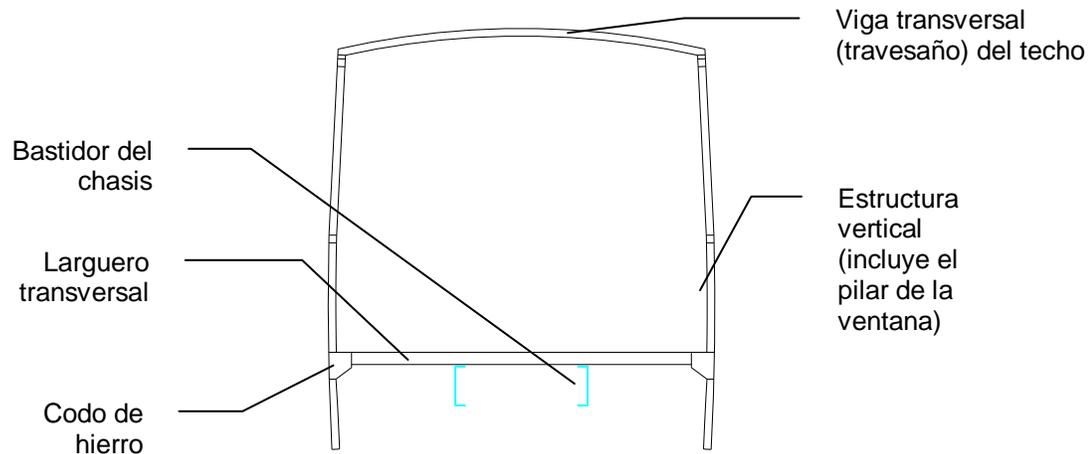


Fig. 2.46 Estructura de pórtico o arco

2.1.4.10 Estructura del piso.

La estructura del piso no sólo soporta directamente el peso de la carga útil del vehículo, sino que juega un rol extremadamente importante en la unión del bastidor del chasis con la carrocería del bus y asegura la rigidez estructural total y la resistencia.

Posición y dimensiones de la sección transversal de los largueros transversales.

Los miembros de los largueros transversales deben ser colocados de tal manera que pueda proveer una conexión segura entre el bastidor del chasis y los elementos de la estructura lateral de la carrocería (pilares verticales principales al frente y detrás de la estructura, pilares verticales hacia adelante y hacia atrás de la puerta de entrada de los pasajeros, pilares de las ventanas, etc.)

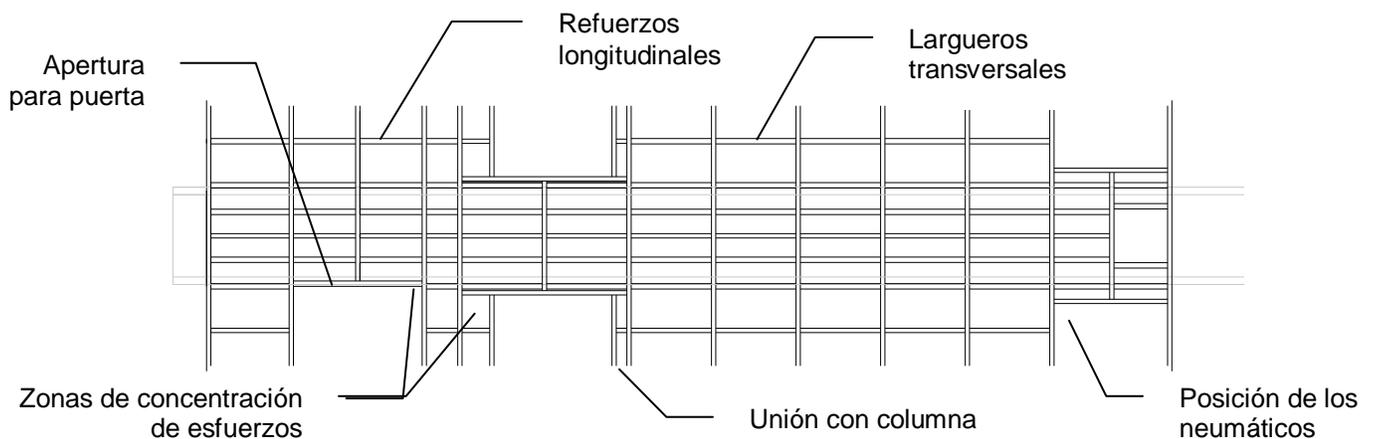


Fig. 2.47 Estructura del piso

Los largueros transversales deben coincidir en lo posible con los elementos de la estructura vertical de la estructura lateral de la carrocería con el propósito de obtener resistencia y proveer una base para montar las otras estructuras de la carrocería y el equipo.

El número total de largueros transversales y la distancia (intervalo) al cual deben ser montados depende de la carga sobre la estructura del piso como un todo y las condiciones bajo las cuales el vehículo será usado (condiciones de la vía por ejemplo), del tamaño y resistencia de los materiales usados en la estructura del piso y del tamaño total del vehículo. Se recomienda una distancia de 300-400 (mm)²².

Para asegurar la resistencia de los elementos del piso frente a las cargas de combamiento y torsionales, deben ser ubicados de tal manera que su momento de inercia de sección sea máximo, esto es, el lado mayor perpendicular al plano del bastidor.

²² Ref. [5]

En el frente y detrás del eje posterior, el grado u orden de los miembros transversales del bastidor del chasis es más ancho, y es importante asegurar la misma rigidez y resistencia integradas con la carrocería, porque en estos lugares la estructura sufre alto régimen de cargas.

2.1.4.11 Estructuras del lado derecho e izquierdo.

Cargas soportadas.

Según se indicó en 2.1.4.8, la mayoría de la fuerza de combamiento que actúa sobre el bus está soportada por la rigidez del esqueleto de las estructuras laterales del lado derecho e izquierdo. La carga torsional transmitida vía bastidor del chasis también actúa sobre las estructuras del lado derecho e izquierdo respectivamente, en forma de cargas de combamiento hacia arriba y hacia abajo. Es por lo tanto, importante incrementar la rigidez al combamiento de las estructuras laterales izquierda y derecha a fin de asegurar la rigidez a flexión y torsional de la estructura como un todo.

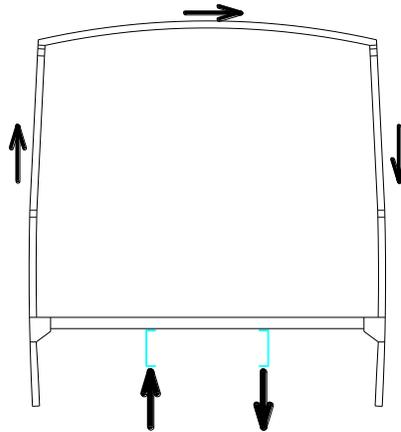


Fig. 2.48 Carga torsional estructuras laterales del lado derecho e izquierdo.

Soporte de cargas: Estructuras de armazón.

En los elementos de la estructura lateral, las estructuras del armazón debajo de las ventanas constituyen en el medio de soporte de cargas más efectivo porque proveen una alta rigidez contra las fuerzas verticales de combamiento. Por lo tanto, todas las cargas deben ser transmitidas hacia ellas.

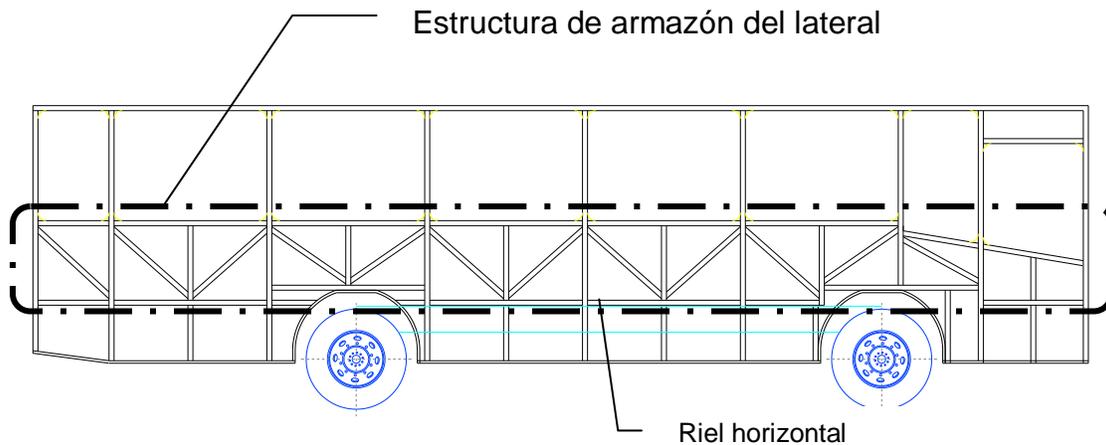


Fig. 2.49 Estructura de armazón del lateral

Las aberturas para las puertas (medio, posterior y de emergencia), interrumpen la alta rigidez al combamiento de esta estructura del armazón y producen una distorsión local extrema y concentración de esfuerzo alrededor de las mismas. Esta distorsión local lleva a un incremento del esfuerzo sobre las uniones de empalme de los pilares de las ventanas. Por lo tanto se debe reforzar las estructuras laterales, particularmente alrededor de las aberturas para las puertas. También se deben reforzar las estructuras laterales alrededor de los compartimientos de los neumáticos, los cuales cortan la estructura del armazón.

Reforzamiento para las estructuras laterales. Pórticos.

Líneas de transmisión de la fuerza en la estructura del armazón deben orientarse de manera continua hacia los pórticos o arcos formados por las columnas y vigas de la estructura principal.

Sin embargo, el espacio disponible para el diseño de las ventanas laterales y el diagrama del equipo montado debajo del piso del vehículo, podría, en algunos casos, impedir la formación de éstos. En este caso, se deben colocar los pilares verticales de tal manera que ellos se cubran dentro de la estructura del armazón y se debe unir estos pilares verticales con miembros de refuerzo diagonales, siguiendo las líneas de transmisión de fuerza dentro de la estructura del armazón. Esto completa efectivamente un arco en el mismo plano y permite una transmisión de fuerza con igual eficiencia, ayudando a prevenir la concentración de esfuerzo sobre un solo miembro.

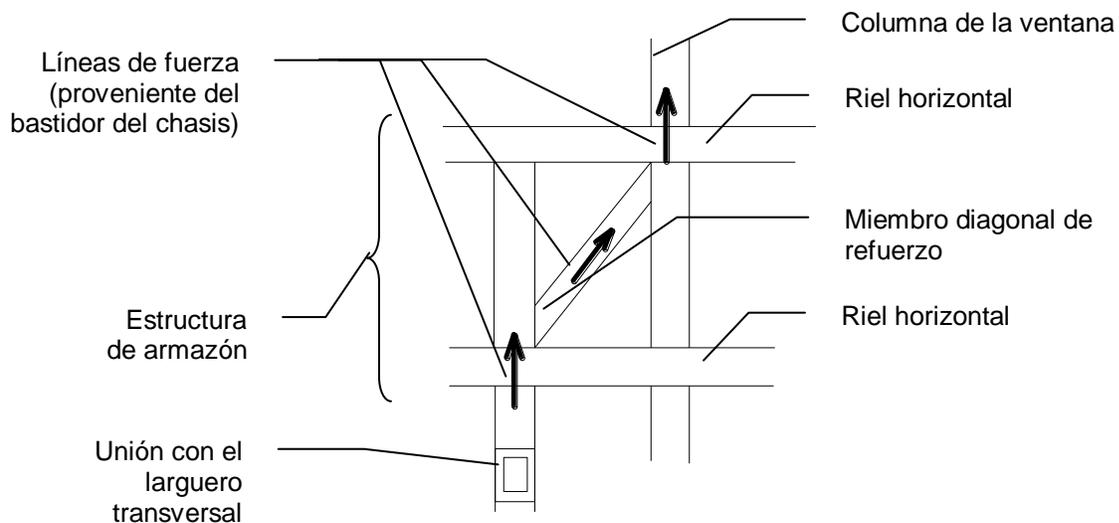


Fig. 2.50 Refuerzo de pórticos mediante miembros diagonales

Reforzamiento para las estructuras laterales. Aberturas para las puertas y los compartimientos para los neumáticos.

Principalmente se debe usar un material grueso y reforzado para los pilares verticales en las partes frontal y posterior de las aberturas para las puertas. Los miembros de refuerzo incluyen pilares dobles, armadura superior, etc. Se logra refuerzo adicional añadiendo placas de esfuerzo o codos de hierro alrededor de las puertas, miembros de refuerzo alrededor de los compartimientos para los neumáticos, etc.

Se debe poner especial cuidado en el material y dimensionamiento de los pilares de las ventanas y de los rieles superiores e inferiores, y que la posición de las juntas (uniones) entre los pilares de las ventanas y las rieles no se conviertan en lugares adicionales de esfuerzo local.

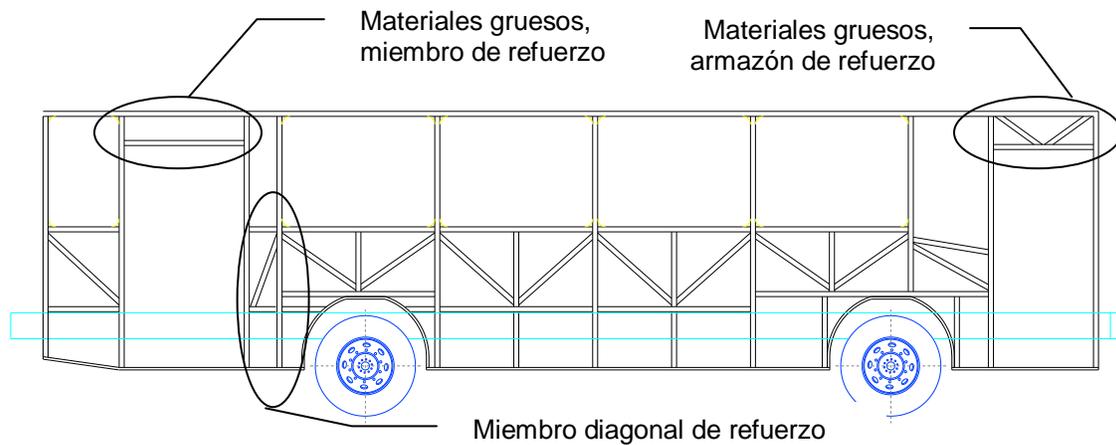


Fig. 2.51 Refuerzo aberturas en estructuras

2.1.4.12 Estructura frontal

Cargas soportadas

La mayoría de las fuerzas internas causadas por la acción de las fuerzas externas sobre la estructura frontal son cargas que tienden a torcer la estructura, puesto que actúan las reacciones desde la superficie de la carretera sobre la carrocería hacia la derecha e izquierda alternativamente.

El parabrisas en su parte del montaje de caucho constituye una importante apertura sobre la estructura frontal y es por lo tanto, difícil asegurar suficiente rigidez torsional en la estructura frontal. Por esta razón, se debe maximizar la rigidez torsional de la estructura frontal y prevenir cualquier carga de torsión sobre el parabrisas. La estructura frontal, incluyendo los miembros transversales

en el extremo frontal del bastidor del chasis, deben formar un "arco" con alta rigidez torsional.

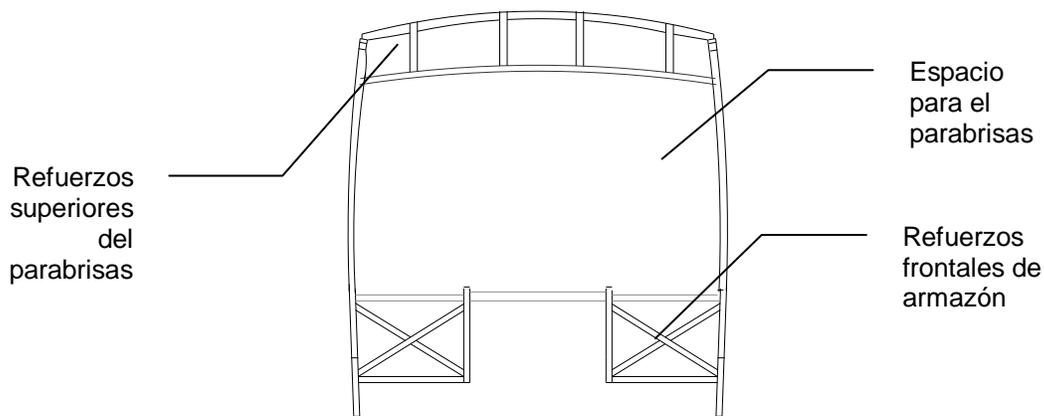


Fig. 2.52 Estructura frontal

2.1.4.13 Estructura posterior

La estructura posterior está montada sobre el extremo del voladizo posterior del bastidor del chasis y está sujeta a la influencia de dos tipos de carga.

- Una carga de combamiento debido a la carga útil que lleva el voladizo posterior.
- Una carga torsional, como la estructura frontal, causada por las reacciones provenientes de la superficie del rodamiento, las cuales actúan alternativamente sobre los lados derecho e izquierdo del bus.

La rigidez al combamiento y torsional de la estructura posterior es particularmente difícil porque el extremo posterior del bastidor del chasis soporta el peso del maletero principal y la provisión de una puerta genera una gran apertura en la estructura posterior. La distorsión resultante del esqueleto de la estructura posterior, puede conducir a problemas tales como agrietamientos de los paneles exteriores de la estructura posterior y el desprendimiento de las uniones con puntos de soldadura.

Por esta razón, se debe colocar los elementos de la estructura posterior de tal manera que se asegure que el esqueleto de la estructura posterior por sí mismo tenga una alta rigidez al combamiento y que la carga desde el voladizo posterior sea transmitida lo más suavemente posible hacia las estructuras del armazón debajo de las ventanas laterales.

En general, una configuración de estructura posterior aceptada es aquella en la que los miembros verticales y horizontales de la estructura posterior están unidos al bastidor del chasis y a las estructuras laterales de la carrocería.

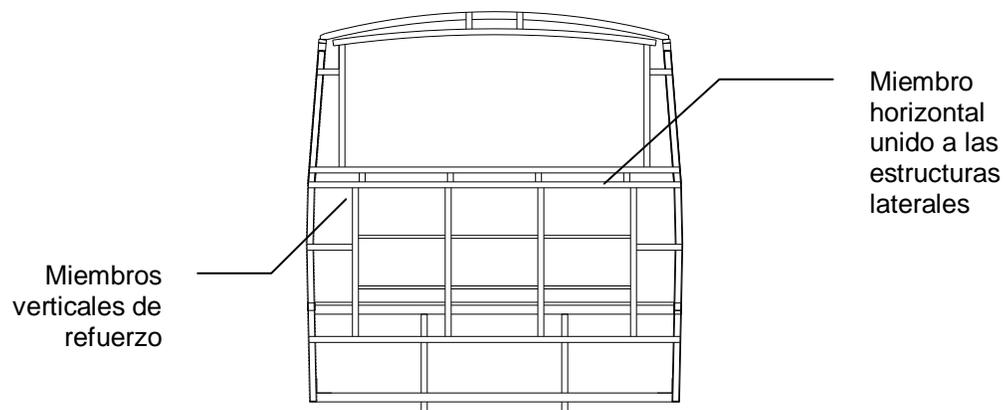


Fig. 2.53 Estructura posterior

2.1.4.14 Estructura del techo

El esqueleto de la estructura del techo muestra estructuras de forma de enrejamiento con miembros extendidos en la dirección frontal-posterior de la carrocería, y travesaños extendidos en la dirección derecha-izquierda.

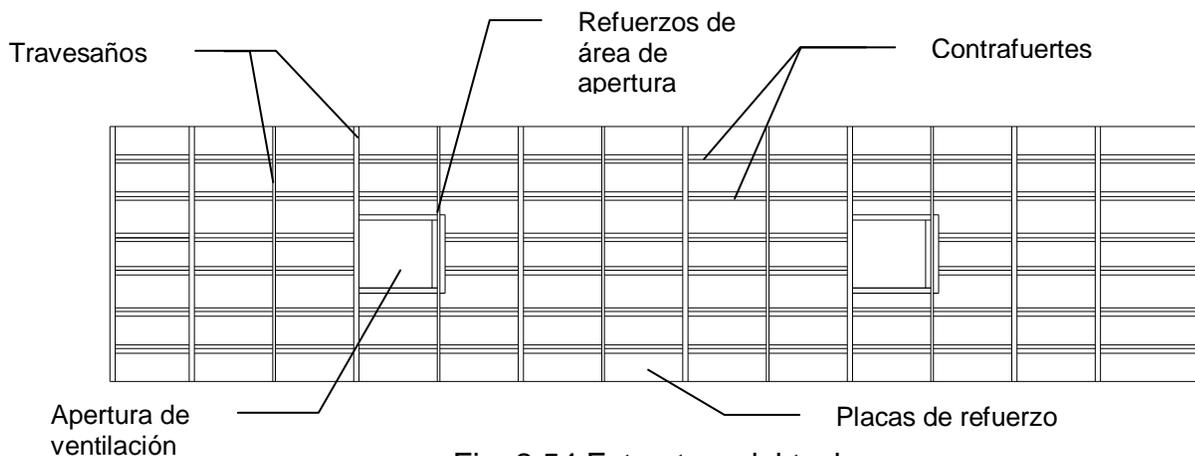


Fig. 2.54 Estructura del techo

2.2 NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES

2.2.1 NORMAS INTERNACIONALES.

Existen tres legislaciones a escala internacional que afectan significativamente el diseño estructural de vehículos de transporte de pasajeros. Estas son:

- Reglamentos anexos al Acuerdo de Ginebra (UNECE).
- Directivas de la CEE²³; que son contribuciones de los países europeos que no se superponen a los reglamentos de UNECE;
- Reglamentos de la American Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS), obligatorios para los vehículos en EE.UU.

2.2.1.1 Normativas internacionales que afectan unidades de transporte de pasajeros

En relación con los vehículos de grandes dimensiones de transporte de pasajeros, en lo que respecta a resistencia de su superestructura existe un reglamento de la FMVSS: «Regulation 571-220. School bus roll-over protection», no hay ninguna Directiva CEE y existen dos Reglamentos de Ginebra: «Reglamento 36 sobre prescripciones uniformes relativas a las características

²³ CEE: Comunidad Económica Europea

de construcción de los vehículos de transporte público de personas» y el «Reglamento 66 sobre prescripciones uniformes, relativas a la homologación de los vehículos de gran capacidad para el transporte de personas respecto a la resistencia mecánica de su superestructura». A continuación se describen sus requerimientos.

2.2.1.2 Requerimientos del Motor Vehicle Safety Standard 216 (Transporte Escolar).

Cuando una fuerza igual a 1,5 veces el peso del vehículo en vacío se aplica en el techo de la estructura mediante un dispositivo rígido de aplicación, se debe cumplir:

- El movimiento vertical descendente de cualquier punto en la aplicación del dispositivo no excederá de 130 (mm).
- Cualquier salida de emergencia del vehículo debe poder abrirse durante y después de la aplicación de la carga con excepción de las salidas localizadas en el techo.

Al aplicar la carga en el dispositivo de ensayo, la velocidad del movimiento de descenso vertical no será mayor de 5 pulgadas por segundo.

Requerimientos del Reglamento 36²⁴

La estructura de las unidades debe ser lo bastante sólida como para soportar una carga estática uniformemente repartida sobre su techo, igual al peso máximo técnico del vehículo o de una masa de 10 toneladas si el peso máximo técnico del vehículo sobrepasa esa cifra.

²⁴ Ref. [1]

Se considera satisfactorio el requisito si se demuestra que, después de la aplicación de la carga de prueba durante cinco minutos, la reducción permanente de la distancia vertical entre el piso y la estructura del techo no excede de 5 (cm) en los elementos que transmiten la carga de la estructura que soporta el techo y 10 (cm) en cualquier otro punto entre esos elementos.

La fuerza de ensayo se aplicará a los elementos resistentes del techo por medio de un dispositivo prácticamente rígido, que se adapte al perfil del techo y cuya proyección vertical envuelva todas las proyecciones verticales de la estructura antes, durante y después de la aplicación de la fuerza de ensayo.

Se aplica a los vehículos no articulados y a los articulados de un solo piso, concebidos y construidos para el transporte de personas, que tengan una capacidad de más de 16 plazas sentadas: de pie, no incluido el conductor.

2.2.1.4 Requerimientos Reglamento 66²⁵.

La estructura del vehículo tendrá la resistencia suficiente como para asegurar que durante y después de pasar por una de las pruebas de volcamiento:

- Ninguna parte desplazada del vehículo invada el espacio asignado a los pasajeros²⁶.
- Ninguna parte del espacio de supervivencia sobresalga de la estructura deformada.

El presente reglamento es aplicable a vehículos de un solo piso construidos para el transporte de más de 16 personas sentadas o de pie, además del conductor y la tripulación.

²⁵ Ref. [3]

²⁶ Espacio de supervivencia, Véase Anexo C y Glosario

2.2.2 NORMAS NACIONALES.

Como se anotó en páginas anteriores, en nuestro país las regulaciones son controladas por el Instituto Ecuatoriano de Normalización mediante las normas:

- “Vehículos automotores. Carrocerías metálicas para buses interprovinciales. Requisitos” NTE INEN 1668:88;
- “Vehículos automotores. Carrocerías metálicas. Requisitos.” NTE INEN 1323:85;
- “Vehículos automotores. Bus urbano. Requisitos” NTE INEN 2205:99.

2.2.2.1 Aspectos generales relativos a las normativas ecuatorianas.

A continuación se revisará los aspectos generales relativos a la construcción de carrocerías metálicas para su uso en el país tanto en transporte urbano como interprovincial, estipulados por INEN:

El chasis.

Distancia mínima entre ejes: 3500 mm.

Distancia máxima entre ejes: 5000 mm

Suspensión: Mecánica de ballesta, con estabilizadores y amortiguadores en ambos ejes.

Voladizo delantero: 800 mm. mínimo.

Voladizo trasero: 40 % de la distancia entre ejes (entre 1400 y 2000 mm).

Angulo de acometida

frontal²⁷: 8° - 12°

Angulo de salida

posterior²⁸: 8° - 12°

²⁷ Angulo de aproximación, véase Glosario

2.2.2.2 La carrocería.

Material de la estructura: Aluminio estructural o acero perfilado o tubular galvanizado.

Parachoques: Metálico dúctil o poliéster reforzado con fibra de vidrio y estructura metálica con gran capacidad de absorber impacto.

Ventanas: Perfiles de aluminio con cierres herméticos de caucho y vidrio automotriz de seguridad con espesor mínimo de 4 mm, que cumplan con la norma INEN 1669.

Material laminado de revestimiento exterior: Chapas lisas de acero o aluminio combinadas con elementos de fibra de vidrio.

Material laminado de piso: Chapas de aluminio anti-derrapante o con recubrimiento de vinil.

Material laminado de revestimiento interior: Chapas de aluminio combinadas con chapas melamínicas o acrílicas.

Angulo de acometida frontal²⁹: 8° - 12°

Angulo de salida posterior³⁰: 8° - 12°

2.3 PAQUETES COMPUTACIONALES ESPECIALIZADOS – FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS.

²⁸ Angulo de alejamiento, véase Glosario

²⁹ Angulo de aproximación, véase Glosario

³⁰ Angulo de alejamiento, véase Glosario

2.3.1 NECESIDAD DEL MODELO FÍSICO – MATEMÁTICO

Las estructuras de esqueleto de las carrocerías para autobuses son sistemas estructurales estáticamente indeterminados (hiperestáticos), en los que, a diferencia de los sistemas estáticamente determinados, en los cuales cualquier variación de dimensiones de las secciones transversales de los elementos así como de los materiales no afecta a las fuerzas internas, estos cambios provocan una redistribución de las fuerzas internas. Por lo tanto no se puede evaluar la resistencia sin realizar un nuevo análisis del comportamiento y distribución de las fuerzas en los elementos del sistema.

Dada la complejidad geométrica de una estructura de esqueleto como se ha observado en las páginas anteriores, y la re – configuración de las fuerzas internas de los miembros cuando se realiza una modificación en la geometría o propiedad de un elemento o elementos de la estructura, es necesario desarrollar un modelo físico – matemático de la misma que brinde resultados confiables y permita realizar las iteraciones necesarias en el proceso de rediseño.

2.3.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE PROBLEMAS ELÁSTICOS EN SISTEMAS ESTRUCTURALES.

Se clasifican como sigue³¹:

Métodos analíticos.

Generales (Teoría de la Elasticidad).

- Método de los desplazamientos.
- Método de las tensiones.

Restringidos (Resistencia de Materiales).

- Piezas prismáticas
- Placas
- Membranas

³¹ Ref. [9]

Métodos numéricos.

- Método de las diferencias finitas.
- Método de los elementos finitos.
- Método de los elementos de contorno, etc.

2.3.3 FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF).

El método de elementos finitos, consiste en sustituir la estructura o el medio en análisis con infinitos grados de libertad, por un modelo matemático compuesto por un conjunto finito de elementos independientes denominados elementos finitos unidos entre sí a través de un número finito de puntos o nodos. La solución del equilibrio del modelo es reducida a la solución de un sistema finito de ecuaciones de equilibrio nodal, en el que intervenga un número finito de variables.

Las aplicaciones prácticas de la mecánica del sólido deformable pueden agruparse en dos grandes familias: la de los problemas asociados con sistemas discretos y la de los problemas asociados a sistemas continuos.

En los primeros sistemas el medio a analizar está dividido, de forma natural, en elementos claramente definidos. En el caso, por ejemplo, el análisis de una estructura en la que cada viga constituye una entidad aislada bien definida. En los segundos el sistema no puede ser dividido en forma natural en unidades simples, por lo que su análisis resulta mucho más complejo.

2.3.3.1 Conceptos fundamentales³².

³² Para definiciones de términos, véase Glosario.

Los sistemas estructurales que se comportan de manera elástica lineal, sufriendo pequeños desplazamientos, actúan de acuerdo a la ley de Hooke, que en su forma general se expresa

$$F = k.x \quad 2.4$$

Que implica que la fuerza aplicada a un resorte es proporcional al desplazamiento observado y a una constante de proporcionalidad conocida como “constante de rigidez” del resorte.

La forma básica de la expresión usada en el análisis matricial (análoga a la ley de Hooke) es

$$\{F\} = [K]\{X\}^{33} \quad 2.5$$

Pero, las estructuras no están compuestas por resortes, sino por vigas y columnas. Para evaluar éstos elementos en la ecuación 2.5 se necesita obtener una expresión de la rigidez de las barras, lo cual puede hacerse usando la ecuación de la deformación de una barra prismática cargada axialmente:

$$\delta = \left(\frac{L}{A.E} \right) P \quad 2.6$$

La ecuación 2.6 puede ordenarse en la forma de la ecuación 2.4:

³³ La notación $\{F\}$ indica que la matriz en particular es de orden $m \times 1$ de la forma $\{F\} = \begin{Bmatrix} F_{1,1} \\ F_{2,1} \\ \vdots \\ F_{m,1} \end{Bmatrix}$ conocida como “matriz columna” o vector.

$$P = \left(\frac{A.E}{L} \right) \delta \quad 2.7$$

Ecuación fundamental.

Por lo tanto, la ecuación fundamental que se aplica en el análisis de sistemas estructurales tiene la forma:

$$\{P\} = [K]\{\Delta\}^{34} \quad 2.8$$

Donde:

$[P]$ es el vector de carga que contiene todas las fuerzas que actúan en las coordenadas estructurales, y puede estar conformado de varias componentes (fuerzas mecánicas, térmicas, gravitacionales, etc.)

$[\Delta]$ es el vector desplazamiento generalizado que contiene los desplazamientos de cada una de las coordenadas estructurales,

$[K]$ es la matriz de rigidez, que es análoga a la constante k de la ley de Hooke.

Coeficiente de rigidez (K_{ij}).

Es la fuerza en la coordenada i cuando un desplazamiento unitario es impuesto en la coordenada j y el desplazamiento de todas las otras coordenadas se mantiene cero.

Matriz de rigidez.

Es una representación de la capacidad del sistema estructural para resistir cargas. Su forma, elementos y tratamiento varían de acuerdo al tipo de elemento analizado.

Para elementos donde se considera seis grados de libertad, la matriz de rigidez tiene la forma general

³⁴ Al igual que 23. En la práctica se omite esta notación generalizando la notación $[P]$ como matriz en general

$$[k] = \begin{bmatrix} [\text{Axial}] & 0 \\ 0 & [\text{Flexionante}] \end{bmatrix} \quad 2.9$$

Para un elemento con seis grados de libertad se tiene la primera columna de la matriz de rigidez axial cuando se desplaza ésta una unidad manteniendo la otra en cero y determinando el valor de la fuerza necesaria para mantener la configuración invariable; del mismo modo para la segunda columna:

$$[\text{Axial}] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}$$

$$[\text{Axial}] = \begin{bmatrix} \frac{A.E}{L} & -\frac{A.E}{L} \\ -\frac{A.E}{L} & \frac{A.E}{L} \end{bmatrix} \quad 2.10$$

Después de realizar los reemplazos correspondientes según 2.7. Del mismo modo se obtiene la matriz de rigidez flexionante:

$$[\text{Flexionante}] = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad 2.11$$

La matriz general de rigidez depende del tipo de elemento finito y de las funciones de desplazamientos nodales asociadas a él. Así, para un elemento prismático definido por el nodo inicial i y nodo final j y con seis grados de libertad por nodo, su matriz rigidez general, tomando en cuenta esfuerzos cortantes producidos por fuerzas cortantes viene dada por³⁵:

³⁵ Ref. [9]

$$[k] = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_x}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_x}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_x}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_x}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_x}{L} & 0 & -\frac{6EI_x}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_x}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_x}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_x}{L^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_x}{L} & 0 \end{bmatrix} \quad 2.12$$

Donde:

E es el módulo de elasticidad de primer orden

G es el módulo de elasticidad a cortante o de segundo orden

A es el área de la sección transversal del elemento

L es la longitud del elemento

I_x e I_y son los momentos de inercia de la sección transversal

J es el momento polar de inercia de la sección transversal

Ecuación fundamental aplicada a cada elemento.

Para cada elemento se aplica la siguiente ecuación, en coordenadas locales referentes al elemento:

$$[p] = [k][\delta]$$

donde:

- $[p]$ es el vector de cargas internas del elemento³⁶;
- $[\delta]$ es el vector de desplazamientos nodales del elemento;
- $[k]$ es la matriz de rigidez del elemento.

Teorías aplicables a la resolución de estructuras por el método de elementos finitos.

En el análisis de estructuras para carrocerías de autobuses se consideran dos teorías principales para el análisis y cálculo:

Según la *Teoría de primer orden o método de rigidez*, un esfuerzo es igual a la variación de la energía elástica almacenada respecto a su deformación correspondiente. Es aplicable a sistemas elásticos con la condición de que pueda expresarse la energía elástica en función de sus deformaciones. En este caso se supone que la estructura se comporta de un modo lineal, es decir, que a un aumento de las cargas exteriores corresponde un aumento proporcional de las deformaciones y de los esfuerzos internos. Este comportamiento se origina en dos suposiciones: que el material tiene un comportamiento lineal y que las deformaciones son pequeñas. Mientras se cumplan estas condiciones es posible ir aumentando las cargas, y todas las soluciones obtenidas son válidas.

Según la *Teoría de segundo orden*, las deformaciones no son pequeñas, por lo tanto las ecuaciones de equilibrio se deben plantear en la posición deformada, y no en la inicial; el comportamiento del material es elástico lineal. En ciertos casos, concretamente en los que la esbeltez es inferior a un valor crítico, se

³⁶ Letras minúsculas indican que se trata de un elemento en particular

debe considerar el comportamiento no elástico. Todo esto conduce a problemas no lineales que suelen denominarse como teoría de segundo orden.

Dado que el *objetivo principal en cuanto al cálculo estructural del presente proyecto es la rigidez, la deformación debe ser muy pequeña*. De donde se deduce que la aplicación de la Teoría de primer orden es la adecuada para el presente proyecto por la razón anotada y por la facilidad de su aplicación.

2.3.4 ETAPAS EN LA SOLUCIÓN DE UN PROBLEMA MEDIANTE EL MEF.

Se siguen en general las siguientes etapas para la resolución de un problema por el método de elementos finitos³⁷:

- Discretización del problema mediante la selección de los elementos interconectados en los puntos nodales.
- Evaluación de las matrices elementales.
- Ensamblaje de la matriz completa del continuo.
- Aplicación de las condiciones de borde o contorno.
- Resolución del sistema de ecuaciones (lineales, no lineales, diferenciales ordinarias).
- Cálculo de otras funciones basadas en las variables nodales.

Los paquetes computacionales generalmente agrupan las fases antes señaladas en tres etapas: preproceso, análisis y postproceso:

³⁷ Ref. [9]

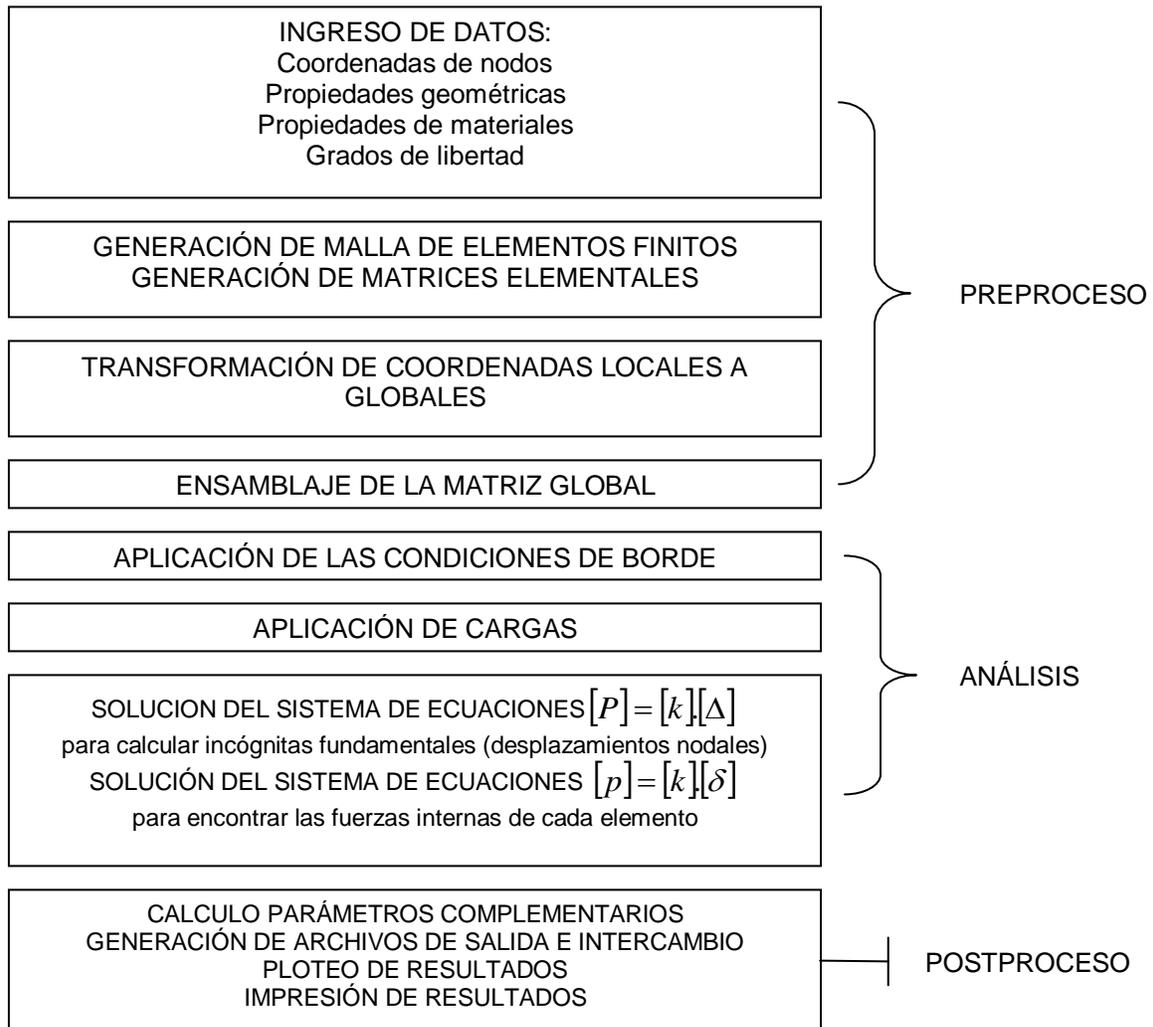


Fig. 55 Diagrama de flujo de los pasos requeridos para un programa de análisis estructural.

- El preproceso abarca la etapa de generación del modelo, generación de las matrices elementales y el ensamblaje de la matriz global.
- La fase de análisis contempla la resolución del sistema de ecuaciones para el cálculo de las incógnitas fundamentales (en nuestro caso los desplazamientos nodales), para lo cual deben especificarse las condiciones de borde (restricciones de desplazamientos en los apoyos)

- con lo cual se reduce el sistema eliminando las ecuaciones que correspondan a los desplazamientos restringidos y el vector de carga.
- La etapa de postproceso corresponde a los cálculos de fuerzas internas en función de cada matriz elemental, de deformaciones, esfuerzos, etc.; así como el ploteo de ayudas gráficas para visualizar la estructura en estado deformado, para ver las zonas críticas de desplazamientos, esfuerzos, etc.

2.3.4.1 Discretización de la estructura en elementos finitos.

Discretizar es generar la malla de elementos finitos. Para esto se utilizan diferentes tipos elementos de forma, entre los cuales se tienen:

- Elementos de barra (bidimensionales o tridimensionales).
- Elementos planos (triángulos, rectángulos -rectilíneos y curvilíneos").
- Elementos espaciales (tetraedros, octaedros -rectilíneos y curvilíneos).

En general, dado que el MEF es un procedimiento aproximado, la precisión alcanzada aumenta con el número de elementos considerados, recomendándose utilizar una discretización gradual, de manera que se obtenga una malla más fina donde hay una variación más rápida de esfuerzos, así se obtiene también mayor aproximación en las zonas de gradientes más grandes y de mayor interés (esfuerzos máximos, etc.).

En este caso, para confeccionar el modelo de elementos finitos de la carrocería se utiliza elementos finitos lineales definidos en un sistema de referencia tridimensional, conectados entre sí en los respectivos nodos. Los desplazamientos de estos nodos son las incógnitas fundamentales del problema.

2.3.4.2 Evaluación de las matrices elementales³⁸.

³⁸ Ref. [9]

Para cada elemento se calcula la matriz rigidez en coordenadas locales de acuerdo con la ecuación 2.11 tomando en cuenta para cada una de éstos las propiedades de cada elemento, de manera que en el caso de sistemas estructurales, los elementos pueden variar en tipo de perfil, sección transversal, material, etc.

2.3.4.3 Ensamblaje de la matriz global del sistema estructural³⁹.

Se requiere obtener la matriz global K del sistema a partir de las matrices elementales. Cada matriz elemental esta definida en coordenadas locales, por lo tanto las mismas deben transformarse a coordenadas globales antes de pasar a ubicarse de acuerdo a la conectividad de la estructura en la matriz global.

La relación entre desplazamientos nodales en coordenadas locales $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ y los desplazamientos en coordenadas globales $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$, está dada por la relación general de cosenos directores⁴⁰:

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \Delta_x \cdot \cos \alpha_1 + \Delta_y \cdot \cos \beta_1 + \Delta_z \cdot \cos \gamma_1 \\ \delta_2 &= \Delta_x \cdot \cos \alpha_2 + \Delta_y \cdot \cos \beta_2 + \Delta_z \cdot \cos \gamma_2 \\ \delta_3 &= \Delta_x \cdot \cos \alpha_3 + \Delta_y \cdot \cos \beta_3 + \Delta_z \cdot \cos \gamma_3\end{aligned}\tag{2.12}$$

Para transformar la relación en matriz se considerará la siguiente transformación:

$$\cos \alpha_i = l_i \text{ para } i = 1, 2, 3 \text{ (cosenos directores del vector axial)}$$

$$\cos \beta_i = m_i \text{ para } i = 1, 2, 3 \text{ (cosenos directores del vector transversal)}$$

$$\cos \gamma_i = n_i \text{ para } i = 1, 2, 3 \text{ (cosenos directores del vector transversal)}$$

³⁹ Ref [9]

⁴⁰ Ref [9]

De donde se obtiene la matriz de transformación:

$$\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \\ \Delta_z \end{bmatrix} \quad 2.13$$

Generalizando se tiene

$$[\delta] = [R][\Delta] \quad 2.14$$

Siendo $[R]$ la matriz de transformación o rotación. De manera análoga

$$[p] = [R][P] \quad 2.15$$

Considerando 2.11 y haciendo los reemplazos correspondientes se tendrá

$$[R][P] = [k][R][\Delta]$$

De donde se obtiene

$$[P] = [R]^T [k][R][\Delta] \quad 2.16$$

Observando la ecuación anterior, se deduce que la ecuación de transformación de matrices en coordenadas locales a globales es

$$[K] = [R]^T [k][R] \quad 2.17$$

2.3.4.3.1 Forma de la ecuación fundamental de análisis de sistemas estructurales.

Como se observó en la ecuación 2.8, la ecuación fundamental de análisis de sistemas estructurales por elementos finitos $\{P\} = [K]\{\Delta\}$ es una ecuación vectorial que tiene la forma⁴¹

$$\begin{bmatrix} p_i \\ p_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ij} \\ K_{ji} & K_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \end{bmatrix} \quad 2.17$$

donde:

K_{ii} es el bloque de la matriz de rigidez que toma en cuenta la variación de las fuerzas internas en el nodo i debido a desplazamientos virtuales desarrollados en el mismo nodo.

K_{ij} es el bloque la matriz de rigidez que toma en cuenta la variación de las fuerzas internas en el nodo i debido a desplazamientos virtuales desarrollados por el nodo j.

K_{ji} es el bloque la matriz de rigidez que toma en cuenta la variación de las fuerzas internas en el nodo j debido a desplazamientos virtuales desarrollados por el nodo i.

K_{jj} es el bloque de la matriz de rigidez que toma en cuenta la variación de las fuerzas internas en el nodo j debido a desplazamientos virtuales del mismo nodo.

En el ensamblaje de la matriz, se van superponiendo los bloques de las barras que tengan nodos comunes, de acuerdo a la conectividad.

2.3.4.4 Aplicación de las condiciones de borde y cargas externas⁴².

Para un sistema estructural de n nodos, la ecuación 2.8 tendrá la forma desarrollada

⁴¹ Ref. [9]

⁴² Ref [9]

$$\begin{bmatrix} P_i \\ P_j \\ \cdot \\ \cdot \\ P_l \\ P_m \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ij} & \cdot & \cdot & K_{il} & K_{im} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{in} \\ & K_{jj} & \cdot & \cdot & K_{jl} & K_{jm} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{jn} \\ & & \cdot \\ & & & \cdot \\ & & & & K_{ll} & K_{lm} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{ln} \\ & & & & & K_{mm} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{mn} \\ & & & & & & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & & & & & \cdot & \cdot \\ & & & & & & & & & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_i \\ \Delta_j \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta_l \\ \Delta_m \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta_n \end{bmatrix} \tag{2.18}$$

Si la ecuación 2.17 se agrupa adecuadamente, de manera que $\Delta_i, \Delta_j, \dots, \Delta_l$ correspondan a los desplazamientos restringidos ($\Delta_i \dots \Delta_n = 0$), las reacciones serán P_i, \dots, P_l que alcanzarán valores aun desconocidos, que son representarnos globalmente por P_I . Las fuerzas externas P_m, \dots, P_n aplicadas en los nodos son conocidas y las representarnos por P_{II} y los desplazamientos de estos nodos $\Delta_m \dots \Delta_n$, son también desconocidos representados igualmente por Δ_{II} . Por lo tanto la ecuación 2.9 se agrupa de la manera siguiente:

$$\begin{bmatrix} P_I \\ P_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{I-I} & K_{I-II} \\ K_{II-I} & K_{II-II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta_{II} \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

De donde se deduce que

$$P_{II} = K_{II-II} \cdot \Delta_{II} \tag{2.20}$$

Siendo K_{II-II} la matriz de rigidez final que relaciona las fuerzas conocidas P_{II} con los desplazamientos desconocidos Δ_{II} . Con esta ecuación se obtienen los desplazamientos nodales en coordenadas globales.

2.3.4.5 Cálculo de las fuerzas Internas en los elementos.

Para obtener las fuerzas internas primero se evalúa para cada elemento la ecuación 2.16 de manera que se obtienen los vectores fuerza en coordenadas globales. Una vez que se tienen evaluadas las fuerzas en los nodos de cada elemento, es de interés expresarlas en coordenadas locales, para lo cual se aplica la ecuación 2.15, de manera que en los nodos i y j de cada elemento se evaluarán: fuerza axial (F_r), fuerza cortante en la dirección v (V_v), fuerza cortante en la dirección s (V_s), momento torsor T_r , momento flector M_s y momento flector M_t

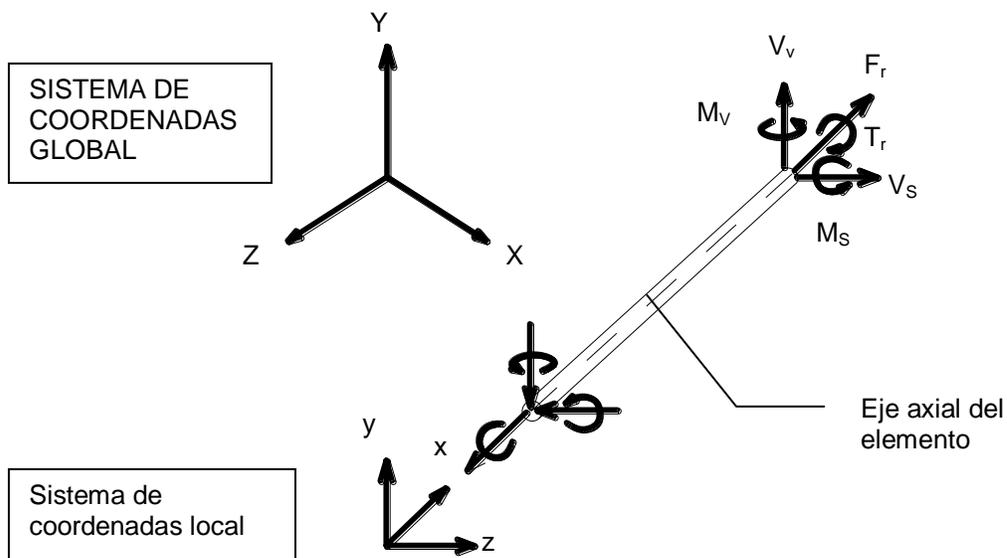


Fig. 2.56 Disposición y orientación de las fuerzas en un elemento de estructura

2.3.5 PAQUETES DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL ESPECIALIZADOS

En la actualidad hay una gran variedad de programas para el cálculo y análisis de estructuras. A continuación se esboza brevemente los paquetes de mayor utilización en el campo de la ingeniería.

SAP2000

Programa de cálculo estructural en tres dimensiones mediante elementos finitos. Descendiente directo de la familia SAP90, muy conocida hace algunos años. En este caso, el programa está totalmente renovado. Tal vez lo más visible sea su nueva interfaz, totalmente integrada en Windows.

Mediante SAP2000 es posible modelar complejas geometrías, definir diversos estados de carga, generar pesos propios automáticamente, asignar secciones, materiales, así como realizar cálculos estructurales de hormigón y acero basados, entre otras normativas, en los Eurocódigos vigentes.

COSMOS

Es otro de los grandes programas de análisis por elementos finitos. Dispone de amplias, con la ventaja de poseer un entorno refinado. Existen versiones de Cosmos que permiten trabajar con programas CAD estándar para modelar geometrías. La versión Cosmos/Works, está preparada para su utilización con el programa SolidWorks, de modelado tridimensional.

Robot Millenium

Programa integrado que, en principio, se podría situar como competencia directa de SAP2000. Entre sus ventajas sobre éste se destaca una interfaz de usuario bastante más depurada y de manejo mucho más sencillo. A nivel de cálculo, es posible definir barras de cualquier sección y diversos materiales (incluyendo madera y aluminio), incluso cables.

Es posible realizar distintos tipos de análisis, lineales y no lineales (tanto de primer como de segundo orden), incluyendo pandeo, análisis modal, etc. Pueden obtenerse notas de cálculo bastante elaboradas, así como planos, algo que no ofrecen otros paquetes.

CAPITULO 3

METODOLOGÍA DE MODELADO, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL

3.1 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE SOFTWARE

3.1.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE SOFTWARE.

Para la correcta selección de los paquetes computacionales que ayuden al proceso de análisis de la estructura de la carrocería del autobús Feline de Miral se deben seguir ciertos criterios generales en orden de importancia:

- Aplicabilidad técnica y principio de funcionamiento.
- Capacidad de manejo y procesamiento de geometría propuesta.
- Principio de cálculo y capacidad de expresión de resultados.
- Disponibilidad en el mercado y factibilidad de manejo

Aplicabilidad técnica y principio de funcionamiento.

Se entiende por objetivo principal que el software alcanza con su desarrollo, el mercado al cual se encuentra orientado y como alcanza los resultados esperados. Dentro de este apartado es de esperarse que el paquete computacional tenga el principio de elementos finitos y del método de la rigidez para la resolución de problemas.

Capacidad de manejo y procesamiento de geometría propuesta.

Se entiende por entorno de la aplicación, que permita un desarrollo ágil de operaciones de preparación y ensamblaje de la estructura y que posea un formato fácilmente reconocible por programas afines.

Principio de cálculo y capacidad de expresión de resultados.

Se refiere a los parámetros de diseño, códigos y normativas que rigen las operaciones avanzadas de dimensionamiento de la aplicación si las posee. Es deseable que éstos concuerden con la aplicación que se pretende desarrollar.

Disponibilidad en el mercado y factibilidad de manejo.

Corresponde a la facilidad de consecución del paquete mediante compra de licencias y copias autorizadas y a la factibilidad del programa de ser estudiado y asimilado en el conjunto de sus capacidades, al asesoramiento disponible y material de consulta aplicable.

3.1.2 ANÁLISIS DE OPCIONES FACTIBLES Y SELECCIÓN DE APLICACIÓN CONVENIENTE.

Atendiendo los requerimientos del presente proyecto es necesario encontrar paquetes computacionales que concuerden con los criterios propuestos.

Paquetes computacionales de modelado

Actualmente existen en el mercado una gran variedad de paquetes computacionales de modelado que ofrecen herramientas para la construcción de diseños en tres dimensiones y presentan diversas ventajas y desventajas. Entre las principales desventajas es necesario notar poca incursión en el mercado, por lo que su uso no es muy difundido

AutoCAD 2006

El software computacional AutoCAD concuerda con los criterios aplicabilidad técnica y procesamiento de geometría deseada, debido su buena capacidad de manejo de entidades en tres dimensiones. Dado que los planos originales de la unidad han sido elaborados en este paquete computacional, y que existe buena disponibilidad en el mercado, dicho programa es elegido para la elaboración del modelado de la estructura en tres dimensiones.

SolidWorks 2006

Del mismo modo, SolidWorks es un conjunto de herramientas de software que presentan gran aplicabilidad técnica. El principio de funcionamiento de dicho programa concuerda con las necesidades del proyecto y la capacidad de diseño de piezas, juntas, uniones y demás componentes de ingeniería detalle se presentan como las virtudes principales a explotar de dicho paquete. El criterio de disponibilidad del mismo lo hacen elegible para su utilización del presente proyecto.

Paquetes computacionales de análisis.

Al igual que con los paquetes de modelado, en el mercado de paquetes computacionales de análisis es posible encontrar diversas opciones con sus respectivas ventajas e inconvenientes.

Siendo el principio de cálculo, la capacidad expresión de resultados y la disponibilidad en el mercado criterios de suma



importancia la hora de elegir un software apropiado, se ha elegido al paquete computacional SAP2000 como el software donde se realice el análisis estructural por su concordancia con el principio de cálculo estudiado y porque sus capacidades están acordes con las necesidades del proyecto.

COSMOSWorks

Es necesario también contar con un software que tendrá capacidad de analizar elementos particulares de la estructura, así como realizar comprobaciones de juntas y uniones entre el conjunto chasis-carrocería y demás componentes de la misma. Por esta razón, y porque su capacidad de manejo, claridad y confiabilidad de resultados, y disponibilidad lo hacen imprescindible para el diseño de detalles del presente proyecto, se ha elegido paquete computacional CosmosWorks para que cumpla con las labores antes mencionadas.

Por lo tanto, en adelante, el diseño estructural a gran escala se realizará con ayuda de AutoCAD 2006, y el análisis estructural compatible se correrá en el entorno de SAP2000 versión 9.0.3. Análogamente, el diseño de detalles de importancia se efectuará través de SolidWorks 2006 y el análisis y simulación de los mismos correrá a cuenta de CosmosWorks 2006.

3.2 MODELADO DE LA ESTRUCTURA.

3.2.1 ANTECEDENTES.

Decisiones fundamentales en la geometría estructural de carrocerías se toman a menudo con poco o ningún conocimiento de cómo ésta decisión afectará otras áreas del sistema.

El proceso de ingeniería progresa a través de una serie de etapas “prueba y error”, donde se debe existir el compromiso entre la esencia del concepto del diseño original y los objetivos del diseño real. Por lo tanto, tales decisiones deben ser comprobadas exhaustiva pero eficaz y rápidamente para investigar sus efectos y asegurar confiabilidad.

Es por este motivo que el análisis de la estructura de una carrocería de autobús toma importancia dentro del proceso de construcción de la misma, porque permite ejecutar cambios en la geometría estructural que serán comprobados seguidamente con métodos analizados en el presente proyecto.

A continuación se exponen ciertos conceptos sobre el análisis de la estructura de la carrocería de una unidad de transporte, donde se observa que el proceso de análisis engloba dos etapas previas que permiten generar la geometría y someterla a condiciones de trabajo.

3.2.2 CONCEPTOS.

El análisis de la estructura de la carrocería de una unidad de transporte consta de un conjunto de procesos que deben ser observados a cabalidad para obtención de resultados apegados a la realidad.

El ordenamiento lógico de estos procesos es dictaminado por las necesidades de la metodología de análisis. Por lo tanto, los procesos que componen la metodología de análisis de la estructura se exponen a continuación:

- MODELADO
- SIMULACIÓN
- ANÁLISIS

Cabe destacar que, aunque se hable de “metodología de análisis estructural”, la terminología correcta es “metodología de modelado, simulación y análisis estructural”, que es el conjunto de procesos que engloba el objetivo que persigue el presente proyecto. La utilización de las terminologías descritas es indistinta, pero debe entenderse como equivalente.

La figura siguiente muestra esquemáticamente el proceso de modelado de la estructura de la carrocería de un autobús de transporte de pasajeros:

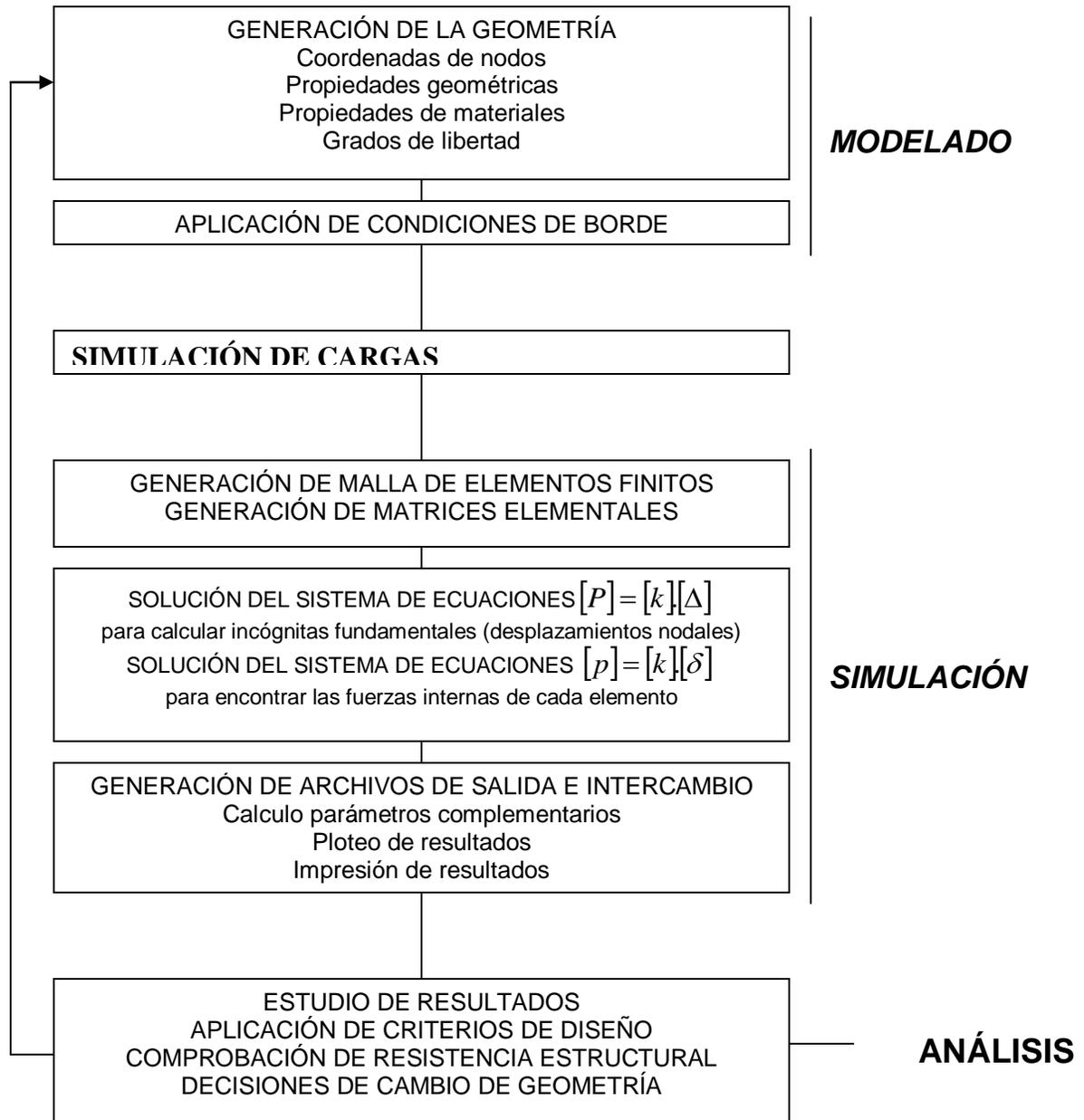


Fig. 3.1 Mapa del proceso de Análisis Estructural

Modelado.

Se analizan los condicionantes a los cuales se rige el modelado de la estructura por medio de elementos finitos, que deberán ser seguidos para garantizar el éxito del análisis (global).

Inicia entonces el proceso de modelado propiamente dicho con la generación de la geometría, la misma que, dado que se realizará un análisis de un sistema existente, debe tener gran apego a la realidad para arrojar resultados satisfactorios.

Seguidamente se estudiarán las condiciones externas que afectan el comportamiento del modelo de la unidad de transporte, tales como restricciones, posiciones iniciales, etc. Tales parámetros definen el “modelo matemático” de la estructura.

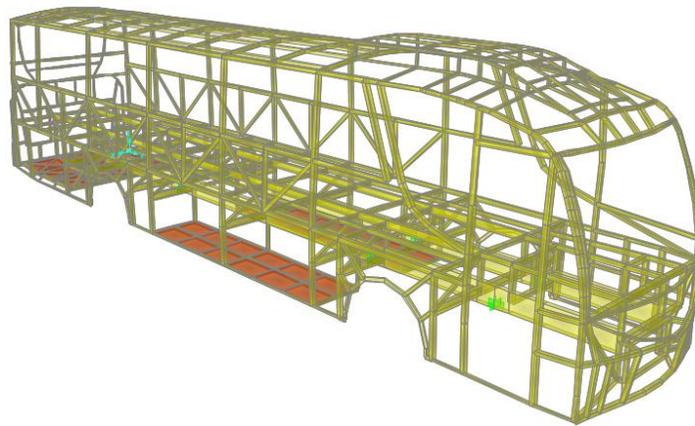


Fig. 3.2 Modelado geométrico de la estructura de la carrocería de una unidad de transporte

Simulación.

Una vez definido el modelo matemático se procederá al establecimiento de las cargas que soportará y al mallado del mismo para la resolución de las matrices resultantes encontrando de esta manera los esfuerzos a los cuales están

sometidos los miembros en particular. La efectividad de la simulación radica en el apego de las condiciones impuestas al modelo con la realidad.

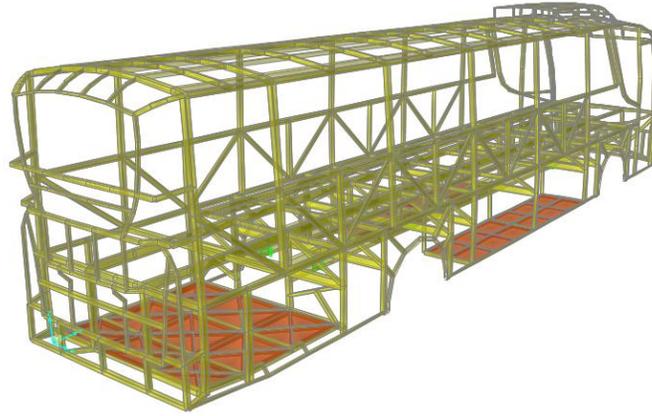


Fig. 3.3 Mallado de la estructura de la carrocería de una unidad de transporte

Análisis.

El análisis es el siguiente proceso dentro de la metodología de estudio de la unidad, donde se observan las zonas sometidas a esfuerzos desmedidos y los miembros más cargados para determinar la validez del diseño y los cambios recomendados para el mejoramiento de su desempeño. Dada la importancia de este proceso, se lo trata en el capítulo siguiente.

El presente capítulo tiene por objeto describir el proceso de modelado de la estructura de la carrocería de una unidad de transporte, para lo cual se inicia con la descripción general de la metodología para este efecto, siguiendo con la particularización de la misma para su aplicación en el análisis de la unidad de transporte Feline de Miral.

3.2.3 ESQUEMATIZACIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA DE MODELADO.

A continuación se muestra la esquematización general de la metodología de modelado la estructura de la carrocería de una unidad de transporte⁴³, donde se observan los procesos consecutivos a seguirse para este fin:

⁴³ Ref. [10]

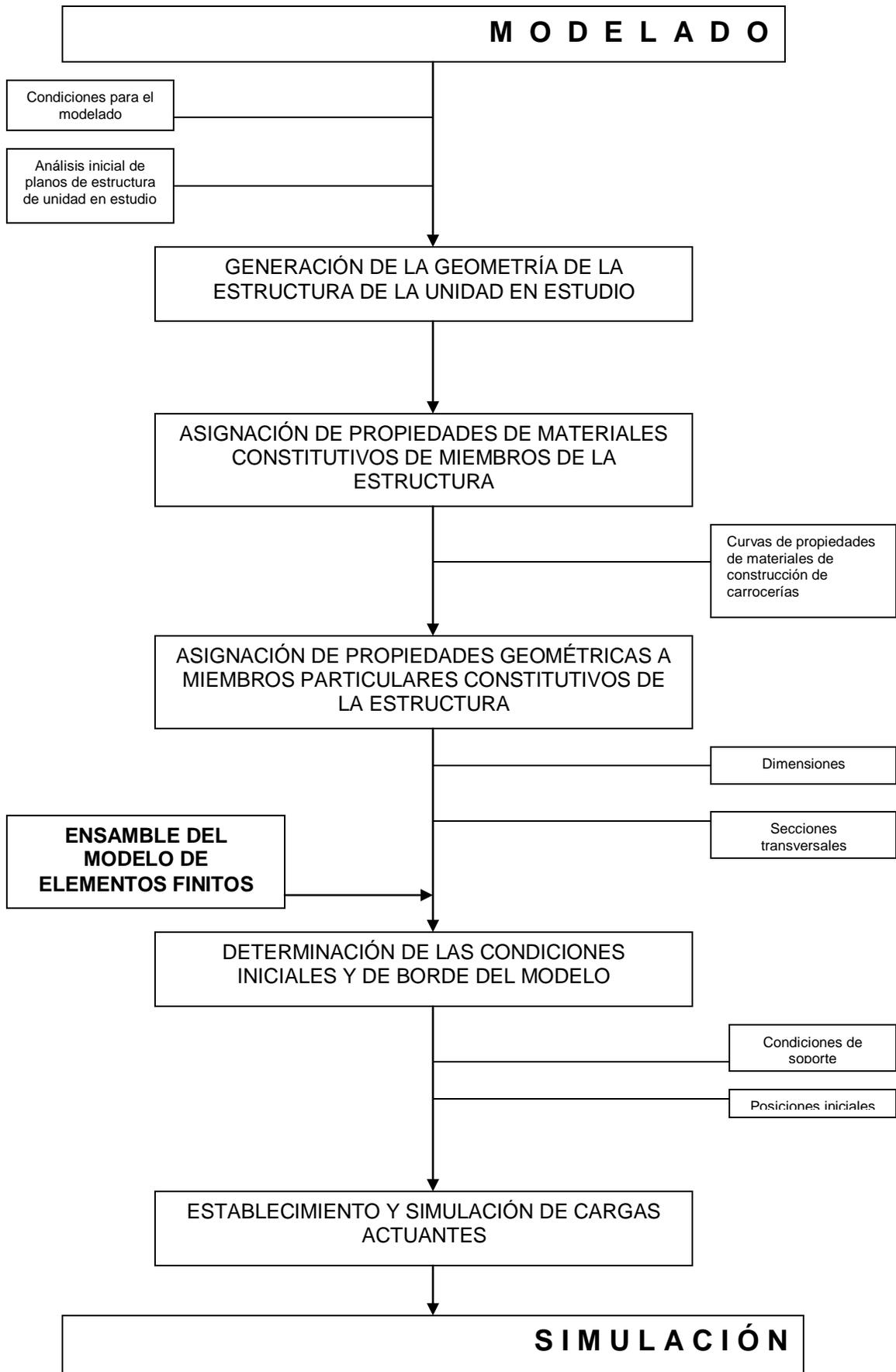


Fig. 3.4 Metodología de modelado la estructura de la carrocería de una unidad de transporte

3.2.4 CONDICIONES GENERALES PARA EL MODELADO DE ESTRUCTURAS⁴⁴.

Geometría.

Se tienen en cuenta todos los elementos tubulares que constituyen estructura para su modelado con su forma original, es decir que los laterales, techo, piso, apoyos, cajuelas, frontal y respaldo serán primeramente esbozados en planos en dos dimensiones para luego ser esquematizados en tres dimensiones de manera que, tanto su ubicación espacial como su dimensiones se apeguen lo más posible a la realidad.

Todas las uniones entre los elementos tubulares se consideran rígidas. El bastidor del chasis se considera en el modelado conservando su forma original, es decir se considera como elemento barra⁴⁵ (canal).

Como dictamina el principio diseño, la estructura se une rígidamente el bastidor y los apoyos de la suspensión se consideran fijos en traslación y rotación.

Características del material.

Dado que los elementos de la carrocería están constituidos de acero estructural JIS-G3132, de características similares a la norma ASTM A501, que es el material de más fácil consecución del mercado, se considera a los mismos como elásticos lineales.

⁴⁴ Ref. [9]

⁴⁵ Dentro de la terminología del proyecto, los elementos barra corresponden a elementos “frame”, elemento de armadura.

Grados de libertad por nodo.

El acercamiento a la realidad de la simulación propuesta exige que el dibujo se realice tres dimensiones, por lo tanto cada nodo va tener seis grados de libertad.

Aplicación de cargas.

Dado que el análisis es estático y dinámico, se consideran cargas de la misma naturaleza: fuerzas concentradas sobre los nodos y fuerzas cuyos valores cambian en el tiempo.

Variación de la geometría de la estructura con aplicación de las cargas.

Como se anotó en el capítulo anterior, la teoría a ser utilizada para el análisis del estructura es la teoría de primer orden que estipula que bajo aplicación de las cargas la variación de la geometría de la estructura será pequeña.

3.2.5 GENERACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA.

La generación de la geometría de la estructura inicia con el análisis de los planos bidimensionales de la unidad, para pasar a la esquematización y ensamble de la misma.

Esquematización de la estructura

La esquematización de la estructura consiste en la representación de la misma en el espacio tridimensional a través de segmentos de recta cuyos puntos de unión constituirán los nodos en la simulación. Inicia con la interpretación de los planos bidimensionales para su posterior transformación en la estructura tridimensional del vehículo. Cabe recalcar que en ciertas zonas de la estructura

se realizan simplificaciones para que el programa de elementos finitos pueda detectar los nodos existentes.

Ensamble de la estructura.

Una vez interpretados los planos y determinadas las posiciones reales de cada elemento, es decir su ubicación espacial dentro del conjunto, es posible ensamblar la estructura tridimensional mediante el armado de independiente de laterales, piso, frontal y respaldo para su posterior ubicación y unión mediante la estructura del techo, que es la encargada de unir y dar forma al conjunto.

3.2.6 ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES GEOMÉTRICAS A MIEMBROS PARTICULARES CONSTITUTIVOS DE LA ESTRUCTURA⁴⁶.

El siguiente proceso de modelado se completa cuando a cada parte se le asigna una sección transversal y dimensión. Cada parte debe ser identificada mediante su tipo de perfil y dimensiones para poder evaluar sus propiedades geométricas (área del sección transversal, momentos de inercia, antes de cortante, etc.).

Los paneles exteriores, puertas, motor, transmisión, unidad aire acondicionado, radiador, suspensión posterior, suspensión anterior se excluyen de la modelación para considerarse únicamente las cargas que generan estos elementos dentro del modelo global.

Utilización de librerías de secciones.

En general, el software especializado en análisis de estructuras y elementos finitos facilita la labor del analista y diseñador presentando en pantalla librerías de secciones que facilitan la asignación a miembros particulares.

⁴⁶ Ref. [9]

Generación de secciones.

En caso de que la sección requerida no se encuentre listada, es necesario modificar la base de datos del software añadiendo la sección que se requiere para que el modelo sea fiel representación de la realidad.

3.2.7 ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES DE MATERIALES CONSTITUTIVOS A MIEMBROS DE LA ESTRUCTURA.

Cada elemento del sistema se caracterizará, además, por las propiedades del material que lo constituye.

Dado que el principal será el acero estructural, y teniendo en cuenta sus propiedades, se debe considerar que el mismo es *homogéneo*, es decir que tiene las mismas propiedades elásticas (E, módulo de elasticidad) en todos los puntos del cuerpo.

Del mismo modo, se considera que el acero estructural que constituye los elementos es *isótropo*, es decir que tiene las mismas propiedades elásticas en todas las direcciones en cada punto del cuerpo.

3.2.8 GENERACIÓN DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.

El modelo en elementos finitos se crea cuando la representación geométrica de la estructura es dividida en porciones cuantificables y totalmente definidas como son los elementos finitos. Este proceso es conocido como mallado. Del mismo depende la exactitud y fidelidad del modelo realizado.

3.2.9 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES DEL MODELO.

La definición de las condiciones iniciales del modelo constituye el punto de partida que define los límites de borde del problema. Es decir, se definirán los tipos de soportes de la estructura, los grados de libertad y los desplazamientos de los mismos.

Seguidamente se definen las posiciones iniciales de los elementos de la estructura mediante de la fijación de sus soportes y las velocidades iniciales de los mismos, si se aplica.

3.2.10 ESTABLECIMIENTO Y SIMULACIÓN DE CARGAS ACTUANTES.

Las cargas externas que generan las reacciones y fuerzas internas estudiadas en el capítulo anterior se analizan con detalle en el numeral siguiente, donde se da énfasis al origen y cuantificación de las mismas para la simulación del modelo.

3.3 SIMULACIÓN DE ESTADOS DE CARGA.

Los estados de carga, conocidos también como “casos de carga⁴⁷” proporcionan información acerca de las máximas sollicitaciones alcanzadas por la estructura en estudio.

Es de interés del presente proyecto simular estados de carga cercanos a la realidad, con un margen de confiabilidad aceptable y enmarcados dentro de buenas prácticas de ingeniería. El detalle en la definición de los mismos hará posible que la simulación tenga el carácter de “representación de la realidad” para que sus resultados brinden la información esperada. Sin embargo, es

⁴⁷ Ref. [11]

necesario tener presente que situaciones reales se pueden presentar condiciones extremas que no ha sido consideradas ya sea por la poca frecuencia con que se presentan o por la falta de fundamento científico respecto.

Por lo tanto, siendo el carácter del presente proyecto el de estudio teórico, es necesario tener presente criterios ingeniería aceptables desde el punto de vista teórico aunque su recurrencia en la realidad sea baja, para tomar en cuenta dentro del análisis situaciones inesperadas y extremas. Lo que significa que en gran parte de las cargas analizadas se tendrá valores calculados asumiendo condiciones teóricas, lo que asignará valores a las cargas con factores de seguridad implícitos.

A continuación se analizará los aspectos fundamentales referentes a las cargas cuantificadas aplicadas a la estructura de la carrocería de una unidad de transporte, aplicando criterios de ingeniería conservadores pero siempre apegados a condiciones de funcionamiento posibles desde el punto de vista teórico.

3.3.1 CASOS DE CARGA EN ANÁLISIS.

Se analizan principalmente dos casos de carga:

- Caso de flexión,
- Caso de torsión.

El caso de flexión, es el caso más frecuente en utilización normal de los vehículos, y el caso torsional, que generalmente resulta en grandes concentraciones de esfuerzo en estructura del bus.

El presente proyecto selecciona el caso de carga a flexión total (abreviado como caso a flexión) y el caso de carga torsional total, con la rueda derecha fuera del terreno⁴⁸ (abreviado de caso torsional), los cuales son los casos más extremos de carga en operación.

3.3.2 SIMULACIÓN DE CARGAS.

El sistema estructural en análisis soporta cargas tanto constantes como variables en el tiempo.

Las cargas variables son aquellas cuya magnitud puede cambiar en el transcurso del tiempo del análisis estructural. Principalmente se analizan las cargas generadas por los pasajeros que la unidad transporta, que son conocidas como cargas vivas⁴⁹, y las cargas generadas por las irregularidades del camino.

Las cargas constantes en el tiempo, conocidas como cargas muertas, son aquellas cuya magnitud no varía en el intervalo de tiempo en el que se realiza el análisis.

A continuación se explica con detalle las magnitudes de análisis de las mismas para su aplicación en el proceso de simulación.

3.3.2.1 Cargas constantes.

Las cargas constantes son aquellas cuya magnitud permanece invariable en el tiempo del cual se realiza el análisis estructural. Son conocidas como cargas muertas. Dentro de este grupo de cargas, se considerará el aporte de todos los

⁴⁸ Ref. [11]

⁴⁹ Dentro del manejo de términos de análisis estructural de carrocerías no tiene mucha aplicabilidad los términos “carga viva” y “carga muerta”

elementos que son indispensables para su funcionamiento al peso total. A continuación se establecen los ítems considerados⁵⁰:

- Carga de cajuelas laterales⁵¹ que es debida al equipaje, es una carga uniformemente distribuida en el compartimiento de equipajes, se establece en kilogramos (kg) en función de la capacidad volumétrica del mismo como $100 \cdot V$, donde V es el volumen de la cajuela en m^3 .
- Carga de cajuela posterior⁵², establecida de manera análoga.
- Carga sobre la parrilla del techo, debe corresponder a una presión mínima de $75 \text{ (kg/m}^2\text{)}$ en toda la superficie del techo destinada para el transporte de carga.
- Peso de cada asiento.
- Peso del tanque de combustible⁵³.
- Peso de motor.
- Peso de la caja de cambios.
- Peso del sistema de dirección.
- Peso del radiador.
- Peso de cada neumático.
- Peso de sistema de embrague.
- Peso de la batería.
- Peso del compresor.
- Peso del sistema de condicionado.
- Peso del sistema de calentamiento.

3.3.2.2 Cargas debidas a los viajeros.

⁵⁰ Los valores de cada uno de los ítems señalados se particularizan en el estudio particular de la unidad Feline, inciso 3.4

⁵¹ Ref. [1,3]

⁵² Ref.[1,3]

⁵³ Valores estimativos tomados de Ref. [11]

Dentro de este grupo de cargas, se considerará el peso de los pasajeros, conductor y un tripulante. Para definir tales cargas, se recurrirá a las referencias indicadas⁵⁴, las cuales recomiendan que para autobuses de turismo que no permiten pasajeros de pie se deben considerar los siguientes valores:

- Peso por pasajero: 71 (kg) (Peso de equipaje de mano: 3 (kg))
- Peso conductor: 75 (kg)
- Peso tripulante: 75 (kg)

Se debe acotar que en el país, tanto en la transportación de turismo como en la transportación interprovincial, no se controla ni restringe la transportación del equipaje de mano. Por lo tanto, para considerar esta condición dentro de los parámetros análisis, se asigna a cada pasajero un peso de 75 (kg) para compensar los efectos de las cargas equipaje de mano no restringidas.

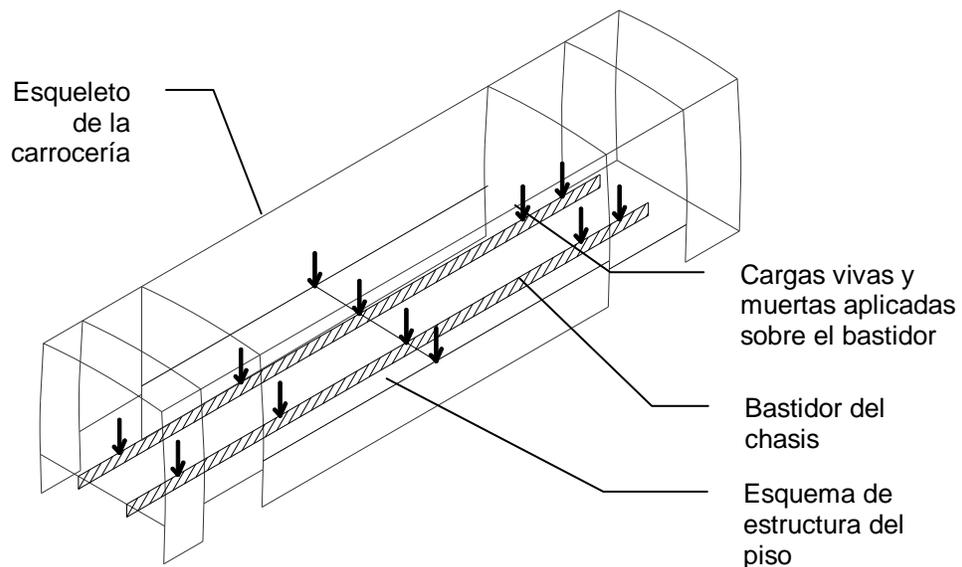


Fig. 3.5 Aplicación e incidencia de cargas vivas y muertas

3.3.2.3 Cargas dinámicas.

⁵⁴ Ref. [1,3]

3.3.2.3.1 Introducción.

La incidencia de las irregularidades del camino sobre la estructura de la carrocería de un autobús es alta en nuestro país, dado el estado de algunas vías por las cuales las unidades deben transitar.

Por lo tanto, el presente proyecto tomará en cuenta la incidencia de cargas que aparecen repetidamente cuando la unidad recorre vías en mal estado como *cargas dinámicas*, analizadas en el apartado correspondiente del capítulo anterior.

Para ello, primeramente se definirá el modelo matemático empleado y los resultados obtenidos de la aplicación del mismo en la estructura del bus.

3.3.2.3.2 Definiciones.

Las cargas dinámicas son cargas fluctuantes cuya aplicación es repetitiva y contabilizada en ciclos. Por lo tanto su acción debilitadora depende de la cantidad de ciclos en los cuales actúe la misma, pues, si se presenta en grandes ciclos de acción, la estructura está sometida a fatiga.

Las cargas dinámicas son producidas principalmente por motivos internos y externos. Los internos son desequilibrios entre piezas de la unidad, y los externos más importantes son las irregularidades de la vía, frenados y giros bruscos, etc. Para el presente apartado es de interés estudiar y cuantificar las cargas producidas por las irregularidades de la vía, pues, es la condición a la que están expuestas todas las unidades que transitan por vías en mal estado.

Para el estudio de las cargas dinámicas se analizan las oscilaciones de sus masas principales. Por lo tanto estas cargas dinámicas se presentan en forma de vibraciones en la estructura.

Lineamientos de estudio.

Para el estudio de las cargas dinámicas se seguirán dos lineamientos generales:

- Estudio Teórico.
- Resultados de investigaciones experimentales.

A continuación se desarrollan los aspectos fundamentales referentes a los lineamientos propuestos.

3.3.2.3.3 Análisis matemático. Estudio teórico.

El estudio teórico de cargas dinámicas se fundamenta en la aplicación de las leyes fundamentales que rigen el movimiento oscilatorio, y de ecuaciones específicas para la simulación de las irregularidades de las vías provenientes de estudios realizados por laboratorios especializados.

Durante las investigaciones de las oscilaciones⁵⁵, todas las masas que componen el automóvil se dividen en dos grupos: masas amortiguadas y sin amortiguar. Las masas amortiguadas se consideran aquellas cuyo peso se transmite a los elementos elásticos de la suspensión, los cuales son la carrocería y el bastidor. Las masas sin amortiguar son las ruedas junto con los ejes.

⁵⁵ Ref. [13]

La figura a continuación muestra el esquema de análisis del tren delantero de un autobús de pasajeros que se utiliza como simplificación y aproximación inicial para el análisis de una unidad de transporte en conjunto.

En el mismo se observa la masa amortiguada simplificada, que representa la carrocería y el bastidor con los mecanismos fijados en él. Del mismo modo se observa la masa sin amortiguar simplificada, que representa a la llanta junto con los ejes.

Hay piezas que están fijadas simultáneamente en las masas amortiguadas y sin amortiguar, caso las piezas de la suspensión, los amortiguadores, los árboles cardanes, etc. Convencionalmente, se adopta distribuir las masas de estas piezas por la mitad entre las masas amortiguadas y sin amortiguar.

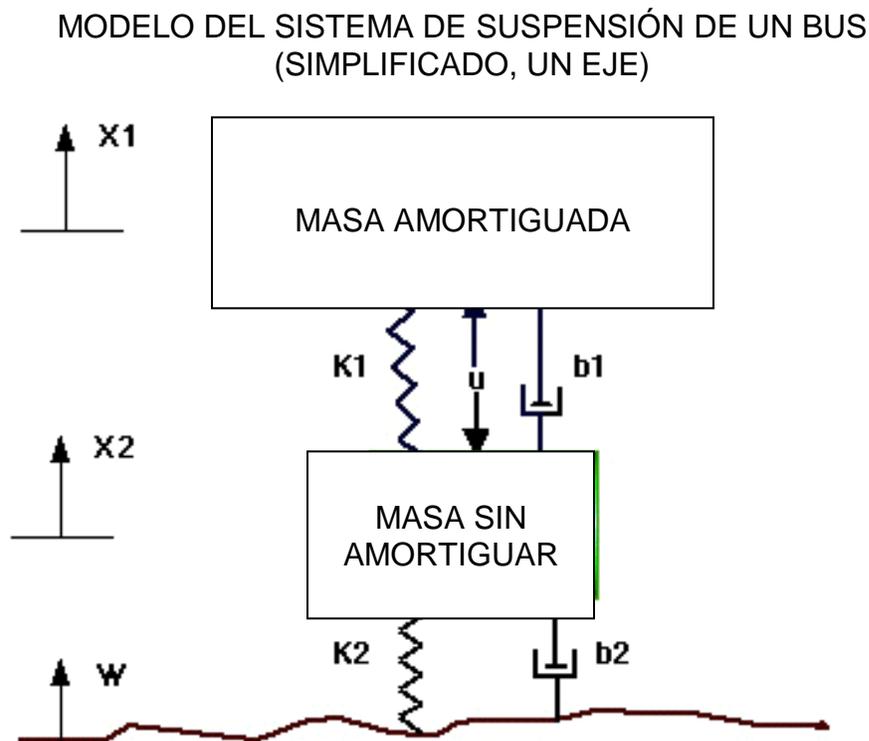


Fig. 3.6 Esquema del sistema oscilatorio simplificado unidad de transporte.

En la Fig. 3.6, K representa la constante de los resortes, b representa la constante de los amortiguadores, X son los desplazamientos esperados y se define la fuerza U, como aquella que actúa en la masa amortiguada.

Se usará la distancia X1-X2, como parámetro de definición porque la distancia entre X1 y W (altura de las irregularidades) es muy difícil de medir y la deformación de las llantas es imperceptible.

Aplicando la ley de Newton, las ecuaciones del movimiento para el sistema presentado son⁵⁶:

$$\begin{aligned} M_1 \ddot{X}_1 &= -b_1(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) - K_1(X_1 - X_2) \\ M_2 \ddot{X}_2 &= b_1(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + K_1(X_1 - X_2) + b_2(\dot{W} - \dot{X}_2) + K_2(W - X_2) - U \end{aligned} \quad 3.1$$

Donde:

M₁ cuantifica las masas amortiguadas (suspendidas), para el caso del autobús Feline es de 12 000 (kgf). Se incluyen las masas compartidas.

M₂ cuantifica las masas sin amortiguar (no suspendidas). Para el caso del autobús Feline se estima 720 (kgf). Se incluyen las masas compartidas.

K representa la constante de los resortes, donde K₁ = 1.7E4 (N/m) (suspensión) y K₂ = 2E6 (N/m) (neumáticos y ruedas)⁵⁷.

b es la constante de amortiguamiento, en este caso b₁ = 350 (Ns/m) (suspensión) y b₂ = 15 (Ns/m) (neumáticos y ruedas)⁵⁸.

El sistema de ecuaciones diferenciales resultante⁵⁹ mostrado en 3.1 presenta conveniencia para su análisis en un software matemático – numérico como Mathcad, y sus soluciones proporcionan información del comportamiento del

⁵⁶ Ref. [51]

⁵⁷ Ref. [11]

⁵⁸ Ref. [11]

⁵⁹ Ref. [14]

sistema y de las fuerzas que actúan sobre el mismo, tanto en magnitud como en naturaleza.

3.3.2.3.4 Modelo matemático.

El modelo matemático utilizado para el análisis del fenómeno reúne condiciones reales encontradas en el funcionamiento de unidades de transporte nacionales y es aplicado al comportamiento teórico de la unidad Feline de Miral.

La figura siguiente representa el modelo multicuerpo analizado, con las consideraciones realizadas en el análisis:

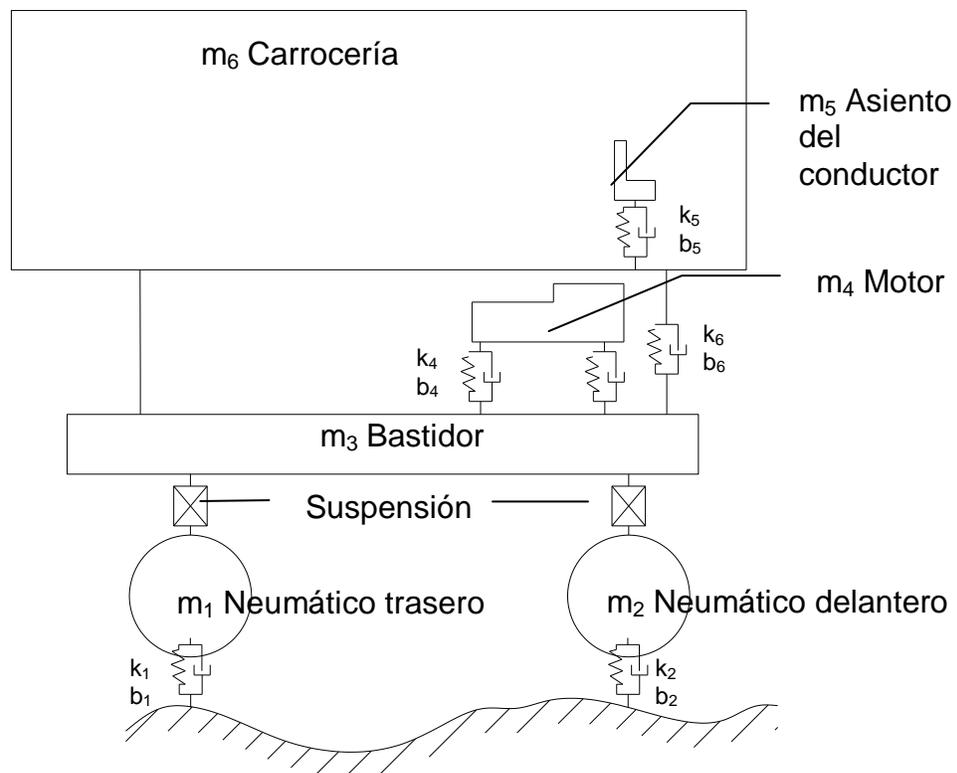


Fig. 3.7 Esquema del sistema oscilatorio de un bus.

Donde⁶⁰:

⁶⁰ Todos los datos obtenidos de Ref. [11]

m_1	es el peso de los neumáticos traseros, 480 (N).
m_2	es el peso de los neumáticos delanteros, 240 (N).
m_3	representa el peso del bastidor del chasis, 4 800 (N).
m_4	es el peso del motor, 11 700 (N).
m_5	representa el peso del asiento del conductor, 100 (N).
m_6	representa el peso de la carrocería, 74 000 (N).
k_1	2E6 (N/m)
b_1	15 (Ns/m)
k_2	4E6 (N/m)
b_2	15 (Ns/m)
k_4	2E3 (N/m)
b_4	182 (Ns/m)
k_5	1E5 (N/m)
b_5	447 (Ns/m)
k_6	9E5 (N/m)
b_6	38500 (Ns/m)

3.3.2.3.5 Comportamiento del sistema.

Con los datos anteriores ingresados, el programa estima el movimiento y las cargas aplicadas en los diferentes cuerpos considerados. A continuación se toman en cuenta tales resultados.

Definición de excitación realista debida a la vía en mal estado.

La hoja de cálculo de Mathcad, de donde se obtendrán estimaciones teóricas del comportamiento de la carrocería en vías irregulares, utiliza ecuaciones diferenciales generales que simulan las condiciones de una vía en mal estado.

Estas ecuaciones son producto de investigaciones y amplios estudios realizados sobre el tema por laboratorios especializados⁶¹. Como referencia se anota una

⁶¹ Ref. [9, 10, 11, 14]

ecuación general que simula las condiciones del mal estado de la vía $s1(t)$, la cual utiliza la siguiente definición:

$$s1(t) := \left[\sum_{i=1}^r \left((\alpha_i \cdot \cos(2 \cdot i \cdot \pi \cdot t \cdot \delta) + \beta_{i-1} \cdot \sin(2 \cdot i \cdot \pi \cdot t \cdot \delta)) \right) \right] \quad 3.2$$

Donde α, β son coeficientes de amplitud y δ de modificación del período de la onda generada con valores determinados de acuerdo a las irregularidades de la vía.

Para graves irregularidades (condición analizada en el programa utilizado), los coeficientes toman valores de:

$$\alpha := \begin{pmatrix} -8.5238095238095 \cdot 10^{-2} \\ 1.2787390025886 \cdot 10^{-1} \\ 7.0383441249932 \cdot 10^{-4} \\ 3.1048302053411 \cdot 10^{-1} \\ -3.3706894757361 \cdot 10^{-1} \\ 2.1524978898283 \cdot 10^{-1} \\ -2.0360351352725 \cdot 10^{-1} \\ 3.0976190476190 \cdot 10^{-1} \\ -2.5602498162985 \cdot 10^{-1} \\ -6.4260459387813 \cdot 10^{-2} \\ -6.0495499212637 \cdot 10^{-2} \end{pmatrix} \quad \beta := \begin{pmatrix} 3.2851543326605 \cdot 10^{-3} \\ -3.9247021690475 \cdot 10^{-1} \\ -2.1366627460535 \cdot 10^{-1} \\ 1.2023541777852 \cdot 10^{-1} \\ 6.2092591111477 \cdot 10^{-2} \\ 4.2512072003927 \cdot 10^{-1} \\ -2.4454907830674 \cdot 10^{-1} \\ -4.0881660420336 \cdot 10^{-1} \\ 9.2395636436012 \cdot 10^{-2} \\ 7.4654599226469 \cdot 10^{-2} \end{pmatrix}$$

$$r := 10$$

$$\delta := 1.9047619047619 \cdot 10^{-1}$$

La ecuación de excitación de la vía tiene la forma

$$u(t) := 0.01 \cdot (s1(t) + \alpha_0 \cdot 0.5) e^{-0.1 \cdot (t-7)^2} \quad 3.3$$

Movimiento.

Considerando una velocidad de 108 (km/h) [30 (m/s)], la excitación para la rueda posterior será de $u(t - t_1)$ y para la frontal será $u(t - t_2)$, donde $t_1=0.15$ (s) y $t_2 = 0$. En base a estudios, el período entre $t = 3$ (s) y $t = 6.5$ (s) es crítico para el comportamiento, por lo que se considerará el mismo para el análisis⁶².

La excitación de las llantas frontales y posteriores se muestra en la siguiente figura:

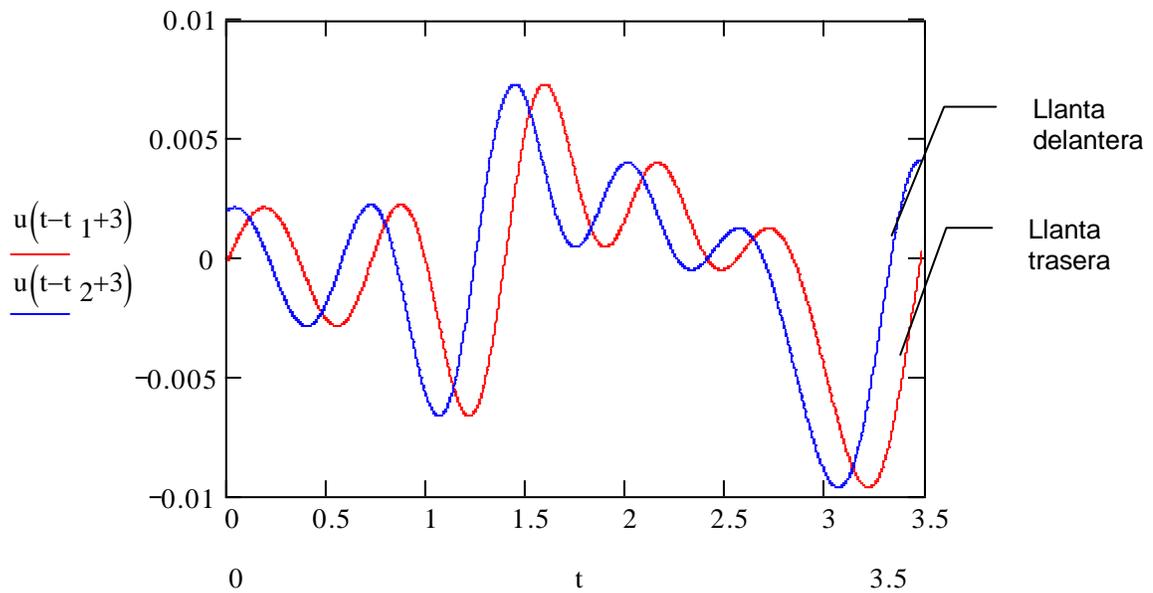


Fig. 3.8 Esquema del sistema oscilatorio inducido a las llantas de la unidad Feline de Miral.

⁶² Ref. [14]

Las gráficas a continuación muestran los resultados de la evaluación del sistema para las condiciones enunciadas en 3.3.2.3.4 y considerando una velocidad de 108 (km/h) al sobrepasar graves irregularidades en la vía.

El movimiento de los neumáticos está expresado en (m) y es fiel al perfil de la irregularidad propuesta. Su máximo cambio de posición es de casi 1 (cm). Dado que las características de la suspensión delantera y trasera son en general iguales, sus movimientos también lo son, aunque es notorio que la rueda posterior se despega menos en ciertas regiones porque soporta mayor carga.

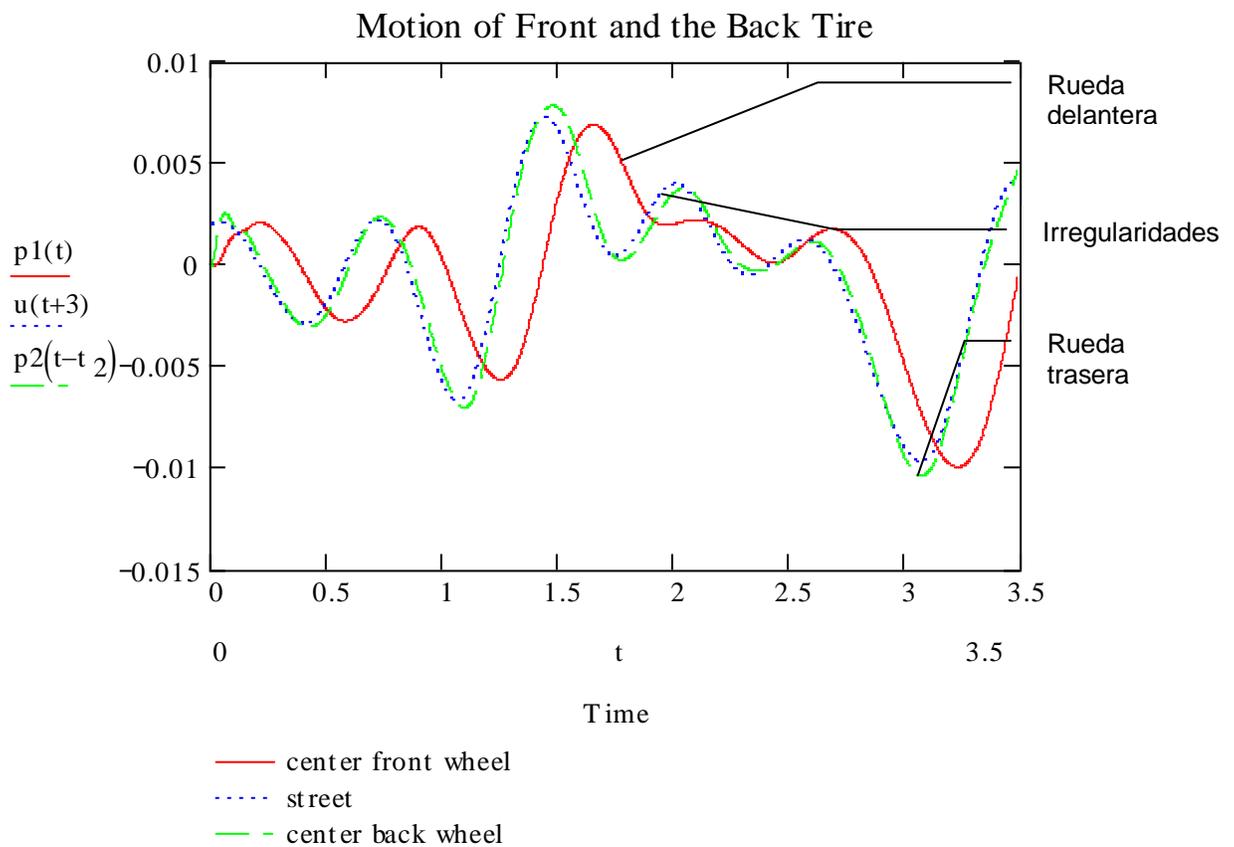


Fig. 3.9 Movimiento de los neumáticos frente a las irregularidades de la vía introducidas para el estudio de la unidad Feline de Miral.

Cargas.

Las cargas a las cuales es sometido el chasis son de interés para el presente proyecto, porque es conocido por lo expuesto en el capítulo 2 que las mismas se transmiten a través de las estructuras del piso y laterales y pueden producir debilitamiento en las partes de la estructura propensas a ser concentradores de esfuerzos tanto por el número de veces en las que incide sobre la estructura como por su magnitud.

Por lo tanto, es importante el estudio de las magnitudes de las mismas porque las condiciones de algunas vías del país exigen la comprobación de la resistencia de las estructuras de las unidades de transporte a tales cargas. A continuación se muestra el diagrama de las cargas dinámicas actuantes sobre la estructura de la unidad transporte Feline de Miral una vez aplicada la hoja de cálculo de Mathcad con datos reales en la misma.

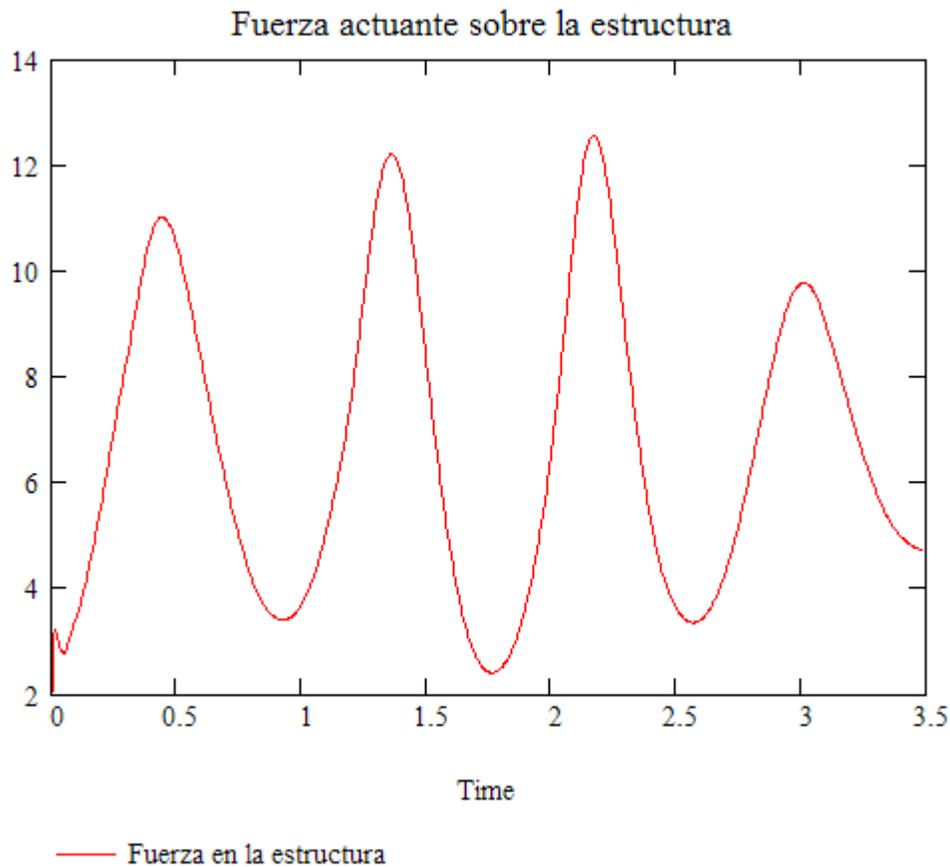


Fig. 3.10 Fuerza dinámica resultante sobre la estructura de la unidad Feline de Miral a consecuencia de las irregularidades de las vías en mal estado.

Es de observarse la naturaleza *fluctuante* de las cargas, con valores pico que pueden apreciarse en la Fig. 3.10, y la tendencia de amortiguación de la onda porque la estructura tiende a absorber las vibraciones a través de los laterales y el piso, principalmente.

3.3.2.3.6 Investigaciones en sistemas reales. Estudios experimentales.

Los efectos de las cargas dinámicas extremas se pueden analizar experimentalmente en condiciones de explotación por diferentes vías, o en pistas dinámicas de simulación de irregularidades en polígonos de prueba, siendo este último el método más utilizado. Los obstáculos para las pistas dinámicas se determinen principalmente en función de la velocidad máxima de traslación, el peso del vehículo y otras consideraciones geométricas. Estas pruebas tienen por objeto registrar cargas y aceleraciones para cuantificar coeficientes dinámicos de carga, que se utilizan para el mayoramiento de las cargas estáticas y así simular condiciones reales de funcionamiento⁶³.

Es así como las investigaciones realizadas para determinar el comportamiento dinámico de este tipo de estructuras determinan que se debe considerar un factor de 1.6 para cargas en el centro, 1.8 para la cola y 1.7 para la parte delantera⁶⁴. Por lo tanto, para un acercamiento a la realidad, se utiliza el método de mayoramiento de cargas estáticas por estos coeficientes dinámicos.

⁶³ Ref. [9]

⁶⁴ Ref. [15]

3.3.2.3.7 Cuantificación de las cargas dinámicas para la simulación. Lineamientos de análisis del proyecto.

En el presente proyecto se analizó la incidencia de cargas dinámicas sobre la estructura de la carrocería de un autobús de transporte, desde el punto de vista teórico como desde el punto de vista experimental. Tanto el análisis de cargas teóricas a las cuales es sometida la estructura que pasa por graves irregularidades, cuanto los resultados de las investigaciones para la determinación de coeficientes dinámicos que permitan cuantificar las mismas, presentan valores válidos a ser considerados en el análisis de la estructura.

La siguiente figura muestra la carga dinámica actuante en la unidad de transporte Feline “normalizada”, es decir, tomada respecto al peso total de la unidad.

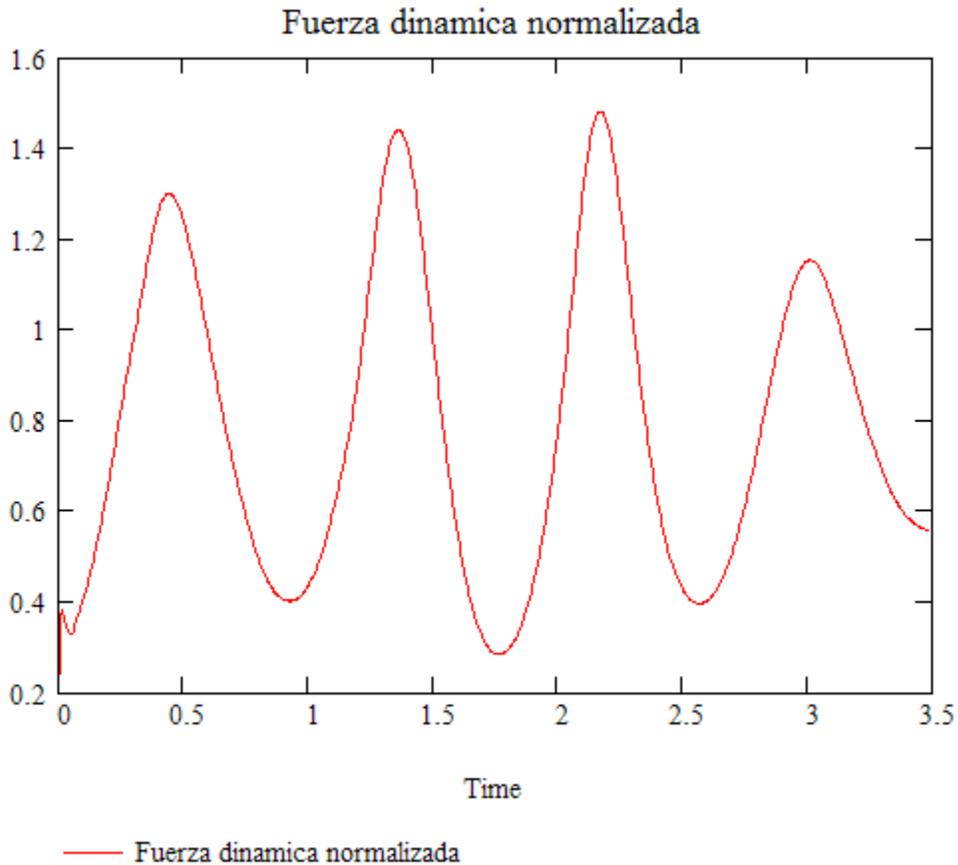


Fig. 3.11 Carga dinámica normalizada tomada respecto al peso total de la unidad Feline

Se observa que el factor de mayoramiento de las cargas dinámicas llega aproximadamente a 1.6, lo que concuerda con los estudios teóricos realizados en este campo. Por lo tanto, el presente proyecto utilizará los resultados del estudio teórico para la simulación de condiciones de vías desfavorables en el software de análisis SAP2000.

3.3.2.4 Carga de resistencia del viento.

Cuando la unidad de transporte recorre las vías a una velocidad determinada V , las partículas de la masa de aire que rodea la misma oponen resistencia a su avance.

La fuerza aerodinámica de resistencia al avance es función de la forma, tamaño y velocidad del vehículo. La resistencia al aire varía muy cerca del cuadrado de la velocidad del viento, y tiene un valor que va de 223 a 378 (N) a 80 (km/h). La fuerza de resistencia al avance se define con la siguiente ecuación⁶⁵:

$$D = C_D \cdot \rho \cdot A \left(\frac{V}{3.6} \right)^2 \quad 3.5$$

donde:

D es la fuerza de resistencia ejercida por las moléculas de la masa de aire que rodea la unidad y que se oponen al movimiento de la misma, (N).

C_D es el coeficiente de resistencia al avance, adimensional.

ρ representa la densidad del aire en el lugar donde el vehículo presta servicio, (kg/m³)

V es la velocidad de traslación del vehículo, (km/h).

A representa el área proyectada frontal de la carrocería, en sección transversal, (m²)

3.3.2.4.1 Coeficiente de resistencia aerodinámica al avance para vehículos y autobuses.

El coeficiente de resistencia aerodinámica al avance es un valor determinado por la forma externa del vehículo. Los vehículos actuales tienen coeficientes de resistencia de 0.30 a 0.55. La tabla a continuación muestra los valores de éstos para vehículos y autobuses. Para análisis detallados de la resistencia al aire de automóviles y buses se utilizan pruebas en túneles de viento:

⁶⁵ Ref. [16]

Tabla 3.1 Coeficientes de resistencia aerodinámica al avance para vehículos y autobuses.

Tabla 3.1 Coeficientes de resistencia aerodinámica al avance para vehículos y autobuses (cont).		Tipo	C_D
Automóvil		De carrera	0.17
		Aerodinámico	0.23
		Convencional	0.52
Autobús		Convencional	0.50
Camión		Convencional	0.60

Fuente: Manual Marks del Ingeniero Mecánico.

3.3.2.4.2 Densidad del aire

El valor de la densidad del aire varía con la altitud del lugar de prueba. A nivel del mar la densidad del aire es $\rho_0 = 1.225 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$, con una presión atmosférica p_0 de 760 (mmHg). Para altitudes diferentes, serán valores de atmósfera estándar que se utilizan para aproximar el valor de la densidad del aire a altitudes diversas⁶⁶. A continuación se muestra un fragmento de la tabla de atmósfera estándar:

Tabla 3.2 Atmósfera estándar.

ALTITUD h , (ft)	RELACIÓN DE PRESIÓN $\frac{p}{p_0}$	RELACIÓN DE DENSIDAD $\frac{\rho}{\rho_0}$
0	1.0000	1.0000

⁶⁶ Ref. [16]

5000	0.8320	0.8617
10000	0.6877	0.7385
15000	0.5643	0.6292

Fuente: Manual Marks del Ingeniero Mecánico.

La ciudad de Quito se encuentra a una altitud de 2850 (m)⁶⁷, lo que equivale a 9350.394 (ft). Interpolando en la tabla anterior se obtiene una relación de presiones de 0.755; por lo tanto, la densidad del aire para la ciudad de Quito es de

$$\rho_{QUITO} = 0.755 \times 1.225 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad 3.6$$

$$\rho_{QUITO} = 0.924 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Como era de esperarse, la densidad del aire en la ciudad de Quito (en la altitud de la Sierra en general) es menor que en el llano.

Para determinar una carga por resistencia de viento que simule las condiciones más desfavorables que tendrá que afrontar la carrocería, se tomará como densidad del aire el valor al nivel del mar, porque presenta mayor oposición al movimiento. Por lo tanto, para la simulación de cargas por resistencia de viento en el presente proyecto se tendrá

$$\rho = 1.225 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

3.3.2.4.3 Velocidad y área proyectada.

⁶⁷ Enciclopedia Multimedia Encarta 2006

Debido a que, en condiciones reales, los conductores de unidades de transporte de pasajeros exceden los límites de velocidad vigentes, el presente proyecto considerará una velocidad de 100 (km/h) para las estimaciones de carga por resistencia del viento, y el área proyectada de la sección transversal de la unidad de transporte Feline.

3.3.2.4.4 Diagrama de incidencia de cargas de resistencia de viento.

La figura a continuación muestra la incidencia de la carga de resistencia generada por el viento sobre el vehículo en movimiento. Su dirección es contraria al movimiento. Su incidencia depende del coeficiente de resistencia frontal del aire, que a su vez depende de la proyección del área frontal de la unidad en la dirección del movimiento.

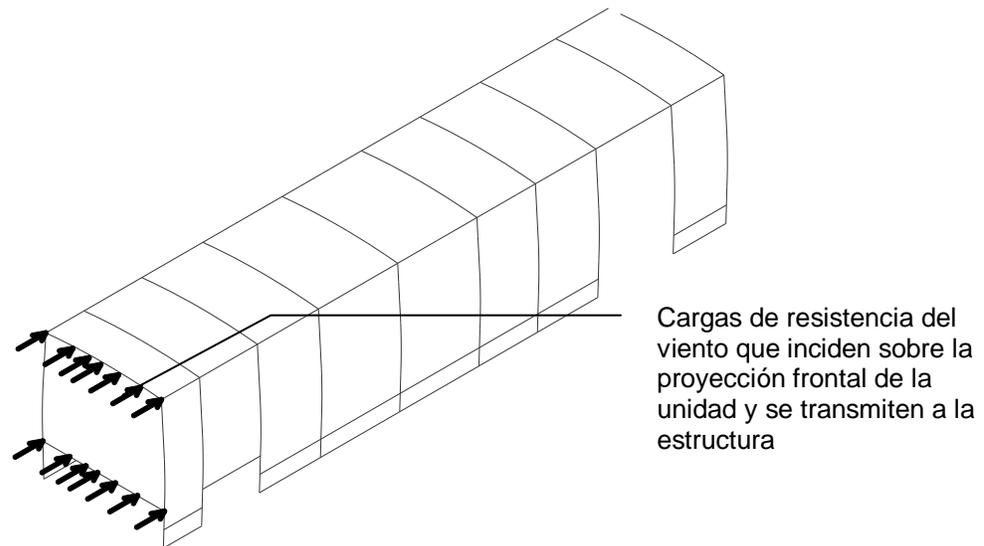


Fig. 3.12 Incidencia de cargas de resistencia del viento

3.3.2.5 Carga de frenado violento.

Cuando se produce un frenado violento, la inercia de la unidad hará que la misma tienda a continuar el movimiento con el que estaba animada; generándose cargas como las analizadas en el capítulo anterior.

3.3.2.5.1 Distancia de detención. Tiempo de reacción. Tiempo de detención.

La distancia recorrida por el vehículo después de haber descubierto un obstáculo hasta que se detiene por completo, es la suma de las distancias recorridas durante tiempo de reacción y el tiempo de frenado.

El tiempo de reacción es el que transcurre entre la percepción del objeto por parte del conductor inicio de la acción para aplicar los frenos; este tiempo no es constante, varía de 0.3 a 1.7 (s), lo cual depende de factores personales y externos. El tiempo de detención es del que toma el vehículo para frenar.

3.3.2.5.2 Fuerza retardadora máxima.

La fuerza retardadora máxima aplicable el vehículo por medio de sus ruedas y está limitado por la fricción entre los neumáticos y el camino, y es igual al coeficiente de fricción multiplicado por el peso del vehículo.

En la actualidad, gran parte del trabajo de desarrollado de neumáticos está dirigido al uso de diversas técnicas fabricación, cinturones de acero, radiales, refuerzos, patrones de huella y compuestos de caucho. Como aproximación, Arnoux estima el coeficiente de fricción en 0.71 para asfalto seco, pero dadas las diferencias entre las distintas marcas y el sigilo empresarial, no es posible presentar valores promedio aplicables a las condiciones actuales⁶⁸.

⁶⁸ Ref. [16]

Sin embargo, es posible considerar que con un coeficiente de 1.0, que es casi máximo para pavimento seco, la fuerza retardadora máxima puede ser igual al peso del vehículo⁶⁹ y puede producir un retardo de 1.0g ó 9.8 (m/s²).

3.3.2.5.3 Análisis de condiciones reales.

Dado que, según normas de tránsito vigentes, la velocidad máxima de circulación de unidades de transporte es de 80 (km/h), se infiere que la condición extrema de frenado se alcanzará cuando la unidad disminuya su velocidad de 80 (km/h) a 0 (km/h) en un tiempo suficientemente corto como para que las cargas se repartan en la unidad y los efectos inerciales se absorban⁷⁰, esto es en unos 5 (s); por lo que se tiene una aceleración aproximada de:

$$a_{FRENADO} = \frac{v - v_0}{t} = \frac{0 - 80/3.6}{5} \quad 3.7$$

$$a_{FRENADO} = -4.4 \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

Para el análisis detallado de la unidad se construye un diagrama de cuerpo libre en el frenado:

N

⁶⁹ Ref. [16]

⁷⁰ Ref. [12]

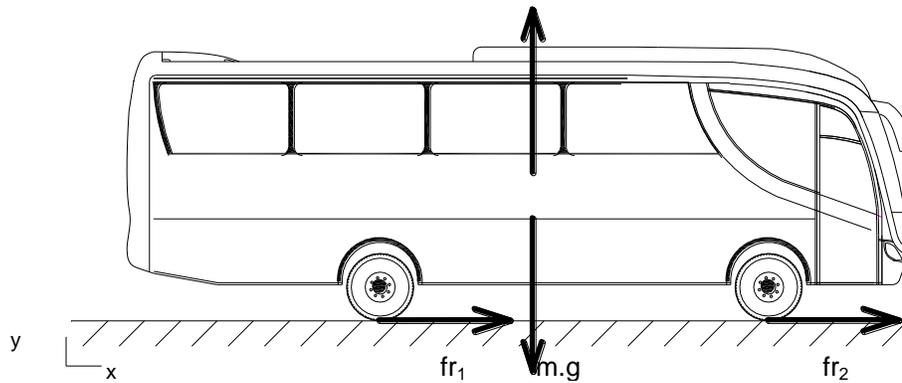


Fig. 3.13 Diagrama de cuerpo libre de unidad de transporte Feline en frenado

Las fuerzas externas actuantes en el sistema son las fuerzas de fricción ejercidas por los neumáticos de la unidad fr_1 y fr_2 que producen las cargas de frenado en la estructura. Para simplificación del problema se considera la fuerza de rozamiento resultante fr que englobe el efecto del total de los neumáticos.

Cabe destacar que las fuerzas de fricción son aquellas que son suficientes para detener el vehículo sin producir arrastre, es decir, sin que la unidad continúe su movimiento con los neumáticos bloqueados. Por ello es que se utiliza el máximo valor del coeficiente estático de fricción.

Planteando las ecuaciones de equilibrio en las direcciones de las fuerzas actuantes se tiene:

$$\begin{aligned} \sum F_y &= 0 & 3.8 \\ N &= M \cdot g \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum F_x &= M \cdot a & 3.9 \\ fr &= M \cdot a \end{aligned}$$

$$fr = \mu \cdot N \quad 3.10$$

Se puede estimar el valor máximo de f_r considerando lo enunciado en párrafos anteriores, es decir, la condición para una fuerza retardadora máxima es estimar un coeficiente de rozamiento máximo entre los neumáticos y el pavimento, esto es

$$\mu_{MAX} = 1.0$$

de donde, reemplazando en 3.9 y 3.7 en ese orden se obtiene

$$f_r = M \cdot g \tag{3.11}$$

Siendo M la masa total de la unidad. Por lo tanto, *la fuerza retardadora máxima es igual al peso propio de la unidad.*

Analizando la unidad de transporte desde el punto de vista de la conservación de la energía se tiene que el trabajo de las fuerzas no conservativas es igual a la variación de la energía cinética de la unidad, y a su vez a la fuerza no conservativa resultante (f_r) por distancia recorrida:

$$W_{ENC} = \Delta E_c = f_r \cdot d \tag{3.12}$$

De donde, haciendo los reemplazos correspondientes se puede obtener la distancia de frenado

$$d = \frac{V^2}{2 \cdot \mu \cdot g} \tag{3.13}$$

3.3.2.5.4 Diagrama de incidencia de carga de frenado.

Las cargas de frenado se transmiten desde los puntos de sujeción de la carrocería hacia las uniones entre la estructura del piso y los laterales y éstos con la estructura del techo, donde son absorbidas por la estructura en conjunto⁷¹:

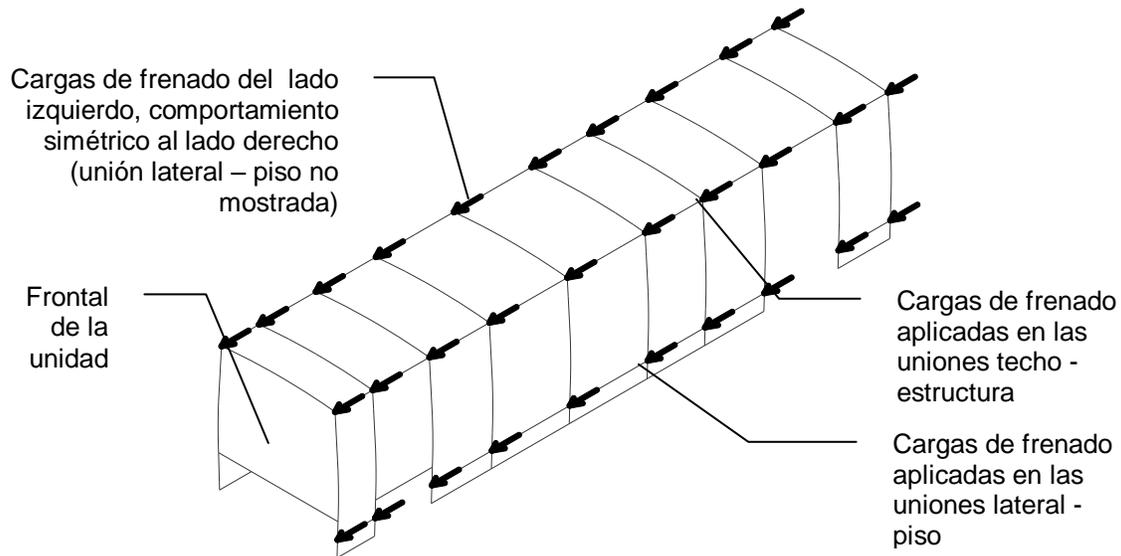


Fig. 3.14 Aplicación e incidencia de cargas de frenado

3.3.2.6 Carga de aceleración violenta.

En circunstancias de aceleración violenta se generan cargas en la estructura de la carrocería cuyos efectos deben estudiarse debido a que, en combinación con las cargas de resistencia del viento puede producir deflexiones indeseables en las columnas de las ventanas.

3.3.2.6.1 Análisis

La razón máxima de aceleración queda limitada por la fricción entre los neumáticos impulsores y la superficie de la carretera. El coeficiente de fricción

⁷¹ Ver Capítulo II, inciso 2.1.4.8.4

depende de la velocidad del vehículo, así como de las condiciones tanto de los neumáticos como del camino.

El análisis se realizara tomando en el que coeficiente de fricción teórico permisible más alto que una buena práctica de ingeniería permita. En un camino seco, el coeficiente de fricción es de alrededor de 1.0⁷²; pero, cuando está mojado, se reduce a 0.4 o menos, según sea la cantidad de agua y la lisura de la superficie⁷³.

En una primera aproximación, para una aceleración de 0 a 96.6 (km/h) se tiene una aproximación del tiempo con la ecuación empírica⁷⁴

$$t = \left(\frac{2W}{T} \right)^{0.6} \quad 3.14$$

donde

t tiempo, (s)

W peso (lb)

T par máximo del motor, (lb.ft)

Sin embargo, para un análisis detallado se siguen los lineamientos utilizados en el análisis de cargas de frenado. A continuación se muestra el diagrama de cuerpo libre para una unidad de transporte de pasajeros en aceleración violenta:

⁷² Ref. [16]

⁷³ Ref. [16], Bosch Automotive Handbook, Primera ed., traducido del inglés.

⁷⁴ Ref. [16], Campbell, "The sports cars", Robert Bentley Inc., 1978

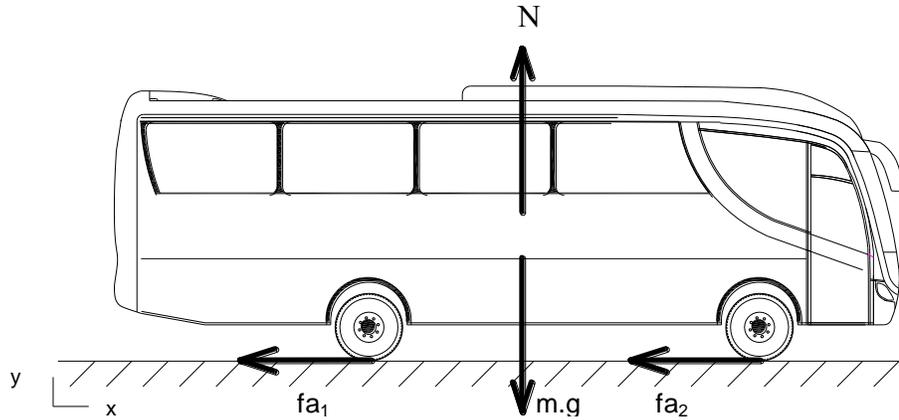


Fig. 3.15 Diagrama de cuerpo libre de unidad de transporte en aceleración

Al igual que el caso anterior, las principales fuerzas actuantes en el sentido horizontal son las fuerzas de fricción estática que los neumáticos generan cuando el vehículo arranca súbitamente. Y de nuevo, una fuerza resultante f_a reemplaza los efectos de las fuerzas de aceleración en las cuatro ruedas.

Las fuerzas de fricción de aceleración tienen la misma naturaleza que las fuerzas de fricción en el frenado, pues se trata del mismo compuesto de caucho sobre el asfalto. El coeficiente de fricción analizado es estático, pues es máximo justo antes de que la rodadura empiece. De este modo se logra obtener la mayor carga de aceleración de condiciones críticas. Por lo tanto se tiene:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= M.a & 3.15 \\ f_a &= M.a \end{aligned}$$

Para obtener la razón máxima de aceleración se debe adoptar

$$\mu_{MAX} = 1.0$$

Con un análisis similar al de las cargas de frenado, se concluye que, pero la condición de máxima razón de aceleración se tiene

$$fa = M.g$$

3.16

Es decir que la carga aceleración súbita en condiciones de máxima sollicitación es igual al peso de la unidad de transporte.

3.3.2.6.2 Diagrama de incidencia de cargas de aceleración.

Las cargas de aceleración, al igual que la desde frenado se transmiten de la desde los puntos de sujeción de la carrocería hacia las uniones entre la estructura del piso y los laterales y éstos con la estructura del techo, donde son absorbidas por la estructura en conjunto:

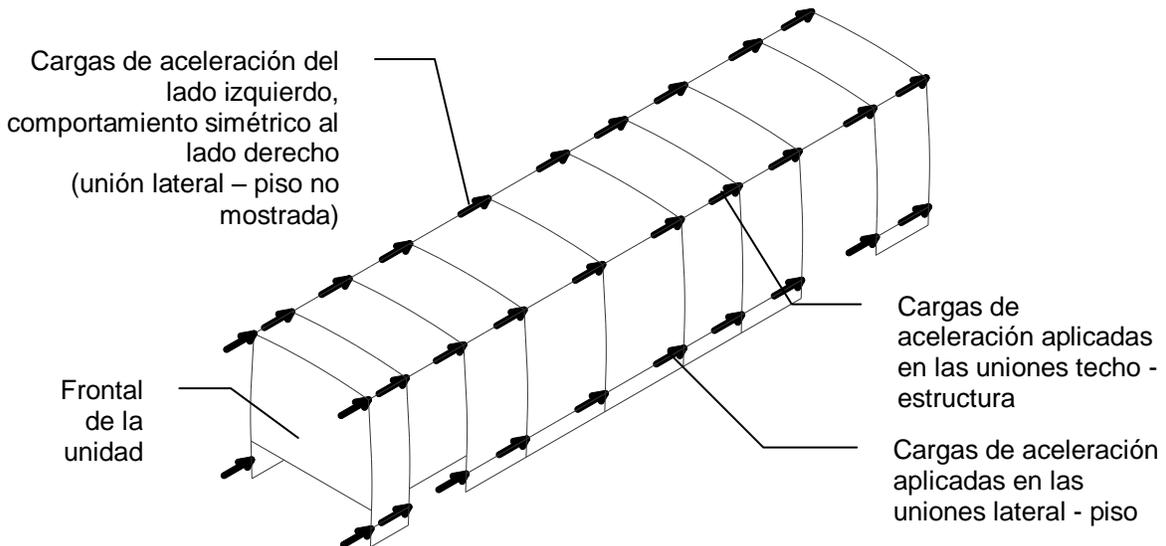


Fig. 3.16 Aplicación e incidencia de cargas de aceleración

3.3.2.7 Cargas de giro.

Al considerar los efectos de curvas y giros sobre la estructura de una unidad de transporte, se debe tener en cuenta el análisis dos casos fundamentales:

- curvas amplias (CARGA DE GIRO CURVAS LENTAS)
- curvas estrechas (cambio de carril) (CARGA DE GIRO CURVAS RAPIDAS).

Para el análisis de ambos casos se utiliza la ecuación de cálculo de la fuerza centrípeta, que es la responsable de la acción de la carga de giro y actúa según se analizó en el capítulo anterior:

$$F_G = M \cdot \frac{V^2}{r} \quad 3.17$$

Donde

F_G es la fuerza de giro que absorbe la estructura,

M representa la masa de la unidad completamente cargada (peso bruto vehicular).

V es la velocidad de traslación de la unidad

r representa el radio de curvatura de la trayectoria seguida.

Para una curva amplia, y de acuerdo con los normativos⁷⁵, la velocidad máxima de un autobús que da un giro de 25 (m) de radio es de 40 (km/h). Para una estrecha no se tienen datos dentro de los normativos, por lo que se adoptará un estimativo de acuerdo a buenos criterios ingeniería⁷⁶. Por lo tanto, se considerará que la unidad realiza un giro de 12 (m) de radio a 60 (km/h).

3.3.2.7.1 Diagrama de incidencia de cargas de giro.

⁷⁵ Ref. [1,12]

⁷⁶ Ref. [12]

Como se analizó en el capítulo II, las cargas de giro son las principales responsables del apareamiento de esfuerzos excesivos en las uniones entre las estructuras del techo y del piso con los laterales.

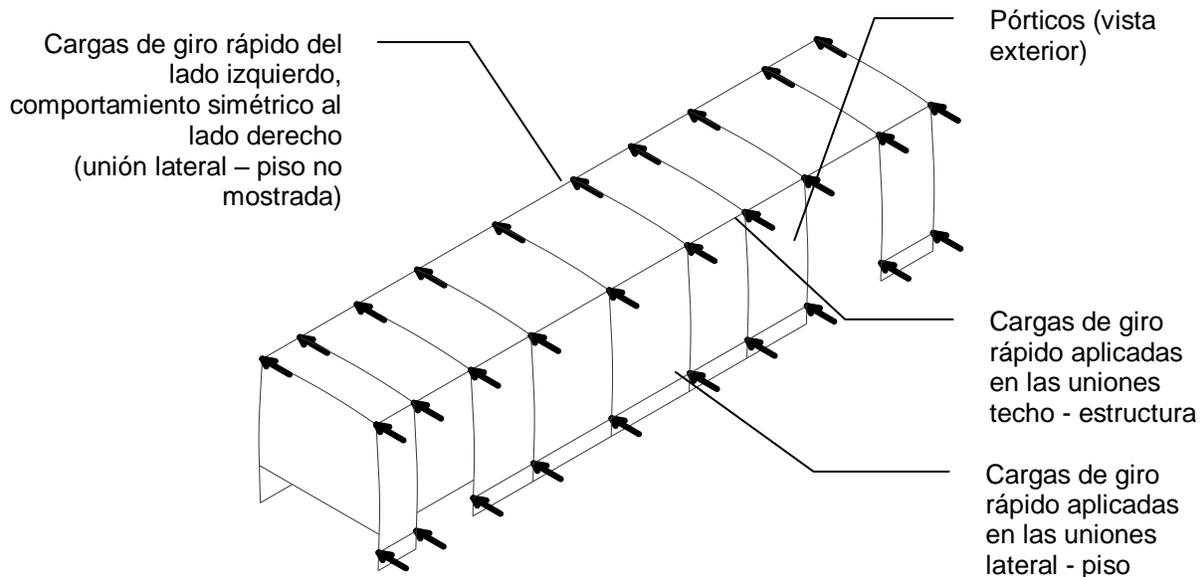


Fig. 3.17 Aplicación e incidencia de cargas de giro rápido

3.3.3 ESTUDIO DE CASOS DE CARGA. SITUACIONES DE CARGA

Como se analizó en párrafos anteriores, los casos de carga de mayor sollicitación e importancia en una unidad de transporte de pasajeros son los casos de flexión y torsión.

Enmarcadas dentro de cada caso se estudiarán situaciones de carga específicas, que simulen condiciones de desempeño críticas que la carrocería deba ser capaz de resistir.

Una vez definidas las situaciones de carga específicas se estudiará el comportamiento de la estructura frente a las cargas reales a las cuales es

sometida, y se determinará aquella situación que sea la más crítica que deba soportar la estructura y de acuerdo a ella se realizará determinación de miembros y zonas más esforzados.

Situaciones de carga.

Se definen como condiciones extremas de carga soportadas por la estructura dentro de la vida útil de la misma que se presentan con relativa frecuencia y contra las cuales se debe diseñar la estructura

Las situaciones de carga a ser consideradas en la simulación de la estructura de la carrocería de una unidad de transporte se describen a continuación.

Después se analizarán uno a uno las situaciones de carga, describiendo cuales son las cargas actuantes en cada uno de ellos y su tratamiento para conseguir situaciones realistas que simulen condiciones de manejo probables.

Es evidente que siempre se considerarán las cargas muertas, por ser el peso de los componentes y de la estructura resistente en sí, y las cargas vivas porque se realizará el análisis mientras la unidad transporta la cantidad completa de pasajeros que le es permitido de acuerdo a las reglamentaciones nacionales e internacionales.

De ahí en más, las situaciones de carga simulan condiciones de vías y de manejo de conductores ecuatorianos, por lo que se pretende, antes de sobrecargar el modelo matemático de la estructura con exceso de cargas, tener un acercamiento con las condiciones de manejo en nuestro país, con las vías y

con ciertas prácticas poco recomendadas pero usuales en nuestro medio para asegurar calidad en el producto.

En este punto, cabe hacer la siguiente puntualización:

CARGA MUERTA = CARGAS CONSTANTES + PESO DE LA ESTRUCTURA
(DEAD⁷⁷)

⁷⁷ Se adoptó la denominación que se le da al **peso de la estructura** en el software SAP2000, véase Capítulos 4 y 5

SITUACIONES DE CARGA

CASO DE FLEXIÓN TOTAL

MARCHA EN ACELERACIÓN POR VÍAS EN ESTADO ACEPTABLE

MARCHA EN ACELERACIÓN POR VÍAS EN MAL ESTADO

MARCHA A VELOCIDAD CONSTANTE EN CURVA AMPLIA

MARCHA EN CURVA ESTRECHA (CAMBIO DE CARRIL)

MARCHA EN CURVA AMPLIA EN MAL ESTADO

FRENADO EN LÍNEA RECTA EN VÍA EN MAL ESTADO

FRENADO EN CURVA AMPLIA

FRENADO EN CURVA ESTRECHA (CAMBIO DE CARRIL)

FRENADO EN CURVA RÁPIDA EN VÍA EN MAL ESTADO

CASO DE TORSIÓN TOTAL

ANÁLISIS DEL COMBAMIENTO DE LA ESTRUCTURA CON RUEDA DELANTERA IZQUIERDA SIN TOCAR LA VÍA POR DONDE TRANSITA LA UNIDAD

Fig. 3.18 Situaciones de carga
clxxxiii

3.3.3.1 Marcha en aceleración lineal por vías en estado aceptable (SC1)

3.3.3.1.1 Consideraciones

La presente situación de carga pretende simular las cargas que la unidad de transporte soporta mientras marcha en aceleración por una vía en condiciones suficientemente aceptables para despreciar la acción de cargas dinámicas. Es de interés el estudio del comportamiento de la estructura en tales circunstancias para observar su respuesta en condiciones de sollicitación media.

3.3.3.1.2 Cargas actuantes.

Las cargas cuyas acciones se consideran en el estudio se muestran en el diagrama a continuación:

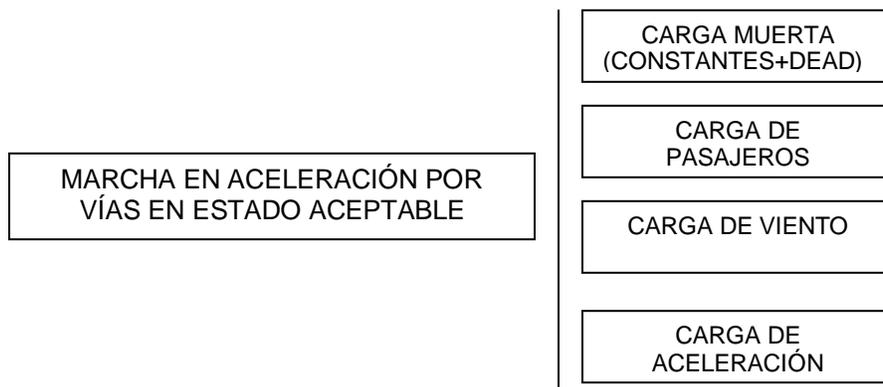


Fig. 3.19 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC1

3.3.3.1.3 Tratamiento y magnitud de las cargas.

Dada la naturaleza del proyecto y del análisis que se plantea, las cargas se consideran de naturaleza estática. La magnitud de las mismas dependerá del caso particular analizado en el numeral 3.4. Es decir, las cargas muertas y de resistencia de viento dependerán del tipo de unidad, forma exterior,

equipamiento, etc., las vivas del tipo y reglamentos permitidos, y las de aceleración de las inercias de la unidad en particular.

3.3.3.2 Marcha en aceleración lineal por vías en mal estado (SC2).

3.3.3.2.1 Consideraciones

Pretende simular las cargas que la unidad de transporte soporta mientras marcha en aceleración por una vía en malas condiciones, por lo que se considera la acción de cargas dinámicas. Es de interés el estudio del comportamiento de la estructura en tales circunstancias para observar su respuesta en condiciones de alta sollicitación.

3.3.3.2.2 Cargas actuantes.

Las cargas cuyas acciones se consideran en el estudio se muestran en el diagrama a continuación:

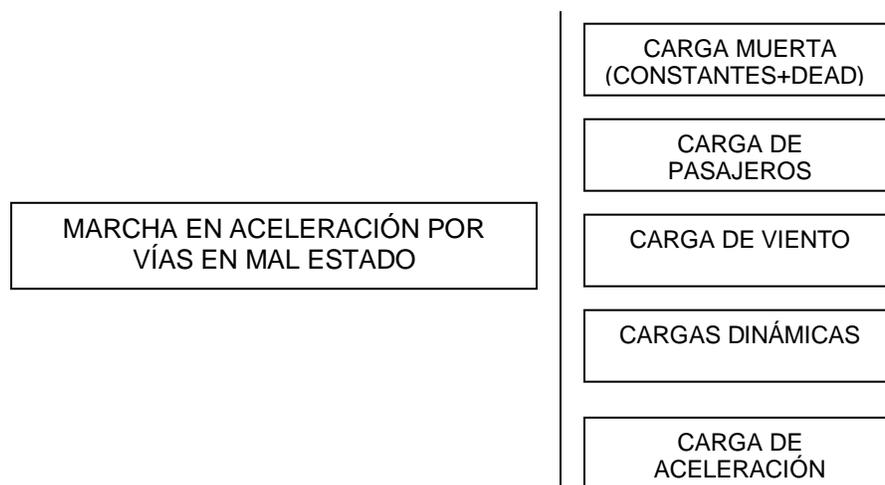


Fig. 3.20 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC2

3.3.3.2.3 Tratamiento y magnitud de las cargas.

Dado que se analizan cargas dinámicas, los lineamientos de aplicación de las mismas son los analizados en 3.3.2.3.7. El resto de cargas son de igual tratamiento al de 3.3.3.1.3

3.3.3.3 Marcha a velocidad constante en curva amplia (SC3).

3.3.3.3.1 Consideraciones

Simula las cargas que la unidad de transporte soporta mientras negocia una curva amplia a velocidad constante (sin considerar aceleraciones tangenciales), por lo que las fuerzas centrípetas necesarias para seguir el trayecto actúan en la unidad. Es de interés el estudio del comportamiento de la estructura en tales circunstancias para observar su respuesta a fuerzas centrífugas.

3.3.3.3.2 Cargas actuantes.

Las cargas cuyas acciones se consideran en el estudio se muestran en el diagrama a continuación:

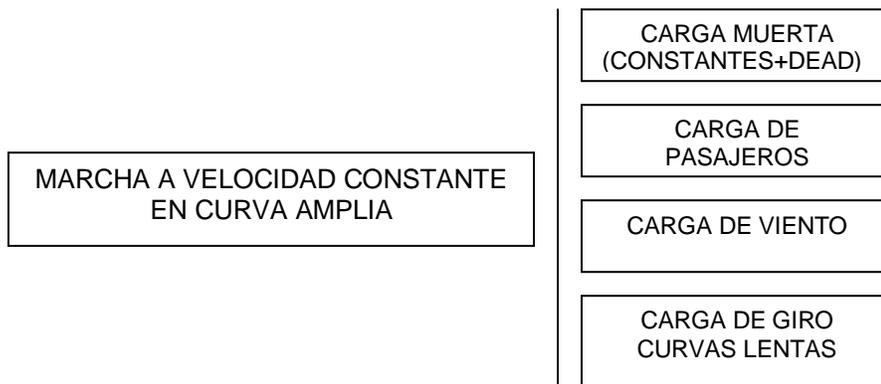


Fig. 3.21 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC3

3.3.3.3.3 Tratamiento y magnitud de las cargas.

La carga de giro se calcula de la manera indicada en el apartado anterior y las restantes reciben el mismo tratamiento que en las situaciones de carga ya analizadas.

3.3.3.4 Marcha en curva estrecha (cambio de carril) (SC4).

3.3.3.4.1 Consideraciones

Simula las cargas que la unidad de transporte soporta mientras negocia curvas estrechas a velocidad constante relativamente alta, cuando se realiza un cambio de carril al intentar sobrepasar vehículos en la vía, por lo que las fuerzas centrípetas necesarias para seguir el trayecto son de magnitud superior a las comparables en curvas amplias. Es de interés el estudio del comportamiento de la estructura en tales circunstancias para observar su respuesta a fuerzas centrífugas que producen esfuerzos considerables.

3.3.3.4.2 Cargas actuantes.

Las cargas cuyas acciones se consideran en el estudio se muestran en el diagrama a continuación:

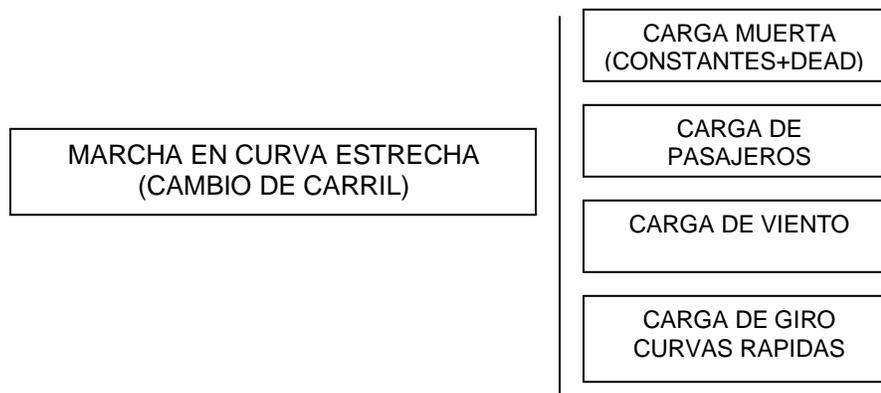


Fig. 3.22 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC4

3.3.3.4.3 Tratamiento y magnitud de las cargas.

La carga de giro se calcula de la manera indicada en el apartado anterior y las restantes reciben el mismo tratamiento que en las situaciones de carga ya analizadas.

3.3.3.5 Marcha en curva amplia en mal estado (SC5).

3.3.3.5.1 Consideraciones

Simula las cargas que la unidad de transporte soporta mientras negocia curvas amplias que tienen irregularidades considerables como cargas dinámicas, por lo que fuerzas centrípetas necesarias para seguir el trayecto actúan en la unidad combinadas con las cargas dinámicas producidas por las irregularidades. Es de interés el estudio del comportamiento de la estructura en tales circunstancias para observar su respuesta a fuerzas centrífugas y dinámicas.

3.3.3.5.2 Cargas actuantes.

Las cargas cuyas acciones se consideran en el estudio se muestran en el diagrama a continuación:

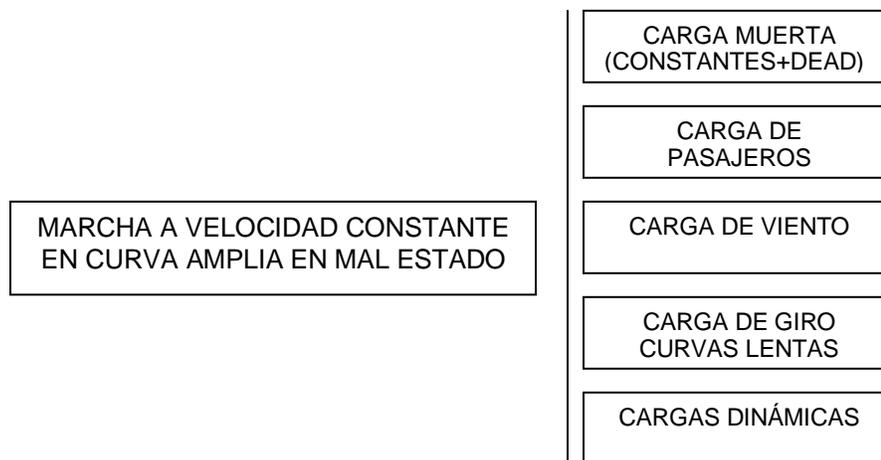


Fig. 3.23 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC5

3.3.3.5.3 Tratamiento y magnitud de las cargas.

La carga de giro se calcula de la manera indicada en el apartado anterior y las restantes, incluidas las dinámicas, reciben el mismo tratamiento que en las situaciones de carga ya analizadas.

3.3.3.6 Frenado en línea recta en vía en mal estado (SC6).

3.3.3.6.1 Consideraciones

Simula cargas que la unidad soporta mientras realiza una detención con una disminución brusca de su marcha. La presente situación es una aproximación inicial al análisis del frenado. Es de interés el estudio del comportamiento de la estructura en circunstancias de frenado para observar su respuesta a fuerzas inerciales.

3.3.3.6.2 Cargas actuantes.

Las cargas cuyas acciones se consideran en el estudio se muestran en el diagrama a continuación:

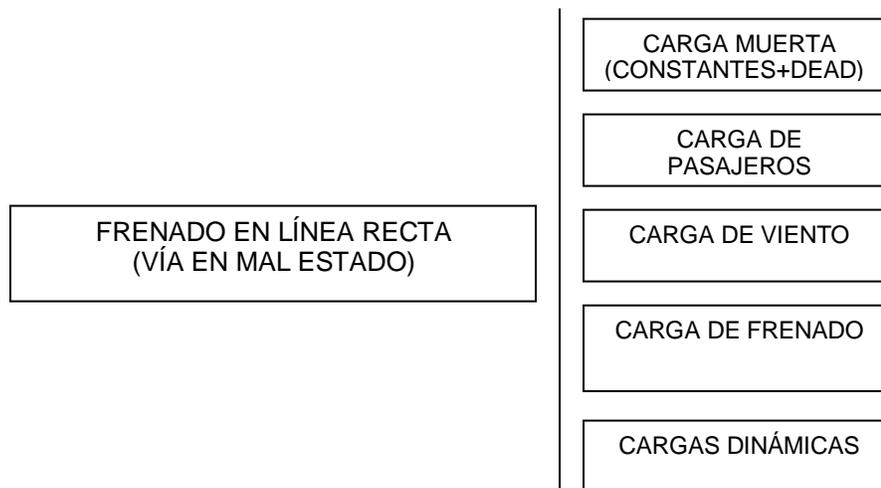


Fig. 3.24 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC6

3.3.3.6.3 Tratamiento y magnitud de las cargas.

Las cargas de frenado se cuantifican de la manera indicada en el apartado de simulación de cargas, y las restantes, reciben el mismo tratamiento que en las situaciones de carga ya analizadas.

3.3.3.7 Frenado en curva amplia (SC7).

3.3.3.7.1 Consideraciones

Simula cargas que la unidad soporta mientras realiza una detención con una disminución brusca de su marcha. La presente situación es una aproximación inicial al análisis del frenado. Es de interés el estudio del comportamiento de la estructura en circunstancias de frenado para observar su respuesta a fuerzas inerciales.

3.3.3.7.2 Cargas actuantes.

Las cargas cuyas acciones se consideran en el estudio se muestran en el diagrama a continuación

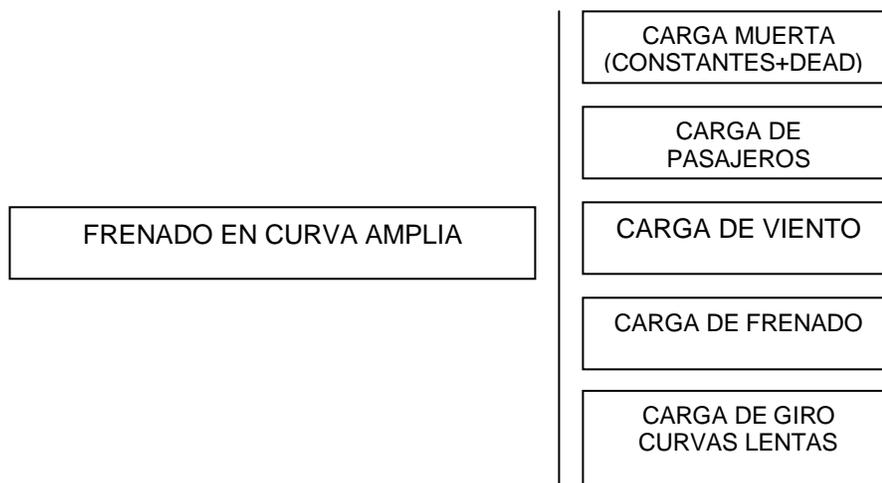


Fig. 3.25 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC7

3.3.3.7.3 Tratamiento y magnitud de las cargas.

Las cargas de frenado se cuantifican de la manera indicada en el apartado de simulación de cargas, y las restantes, reciben el mismo tratamiento que en las situaciones de carga ya analizadas.

3.3.3.8 Frenado en curva estrecha (cambio de carril) (SC8).

3.3.3.8.1 Consideraciones

Simula cargas que la unidad soporta mientras realiza una maniobra de frenado en una curva estrecha, cambiando de carril. Es de común incidencia la presente situación por el estilo de manejo de los conductores ecuatorianos, por la realización de adelantamientos en condiciones poco recomendables y por la toma de decisiones de último momento al evitar hacer el adelantamiento y regresar a la posición original.

3.3.3.8.2 Cargas actuantes.

Las cargas cuyas acciones se consideran en el estudio se muestran en el diagrama a continuación

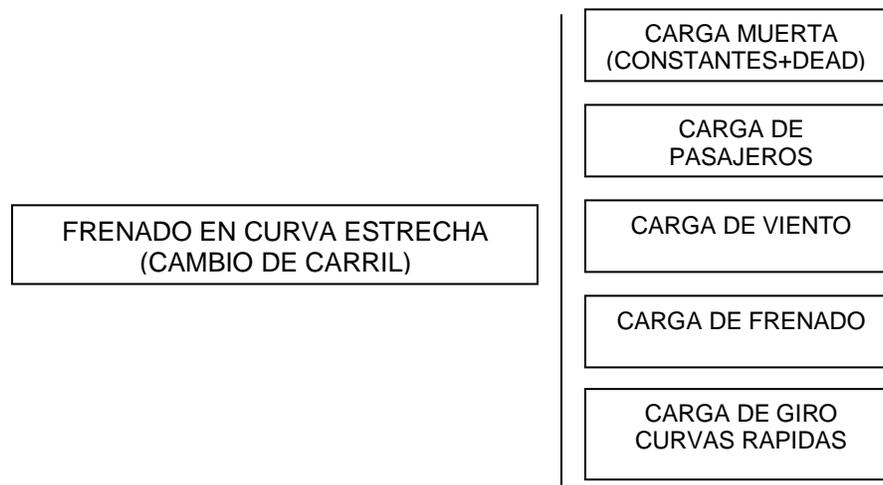


Fig. 3.26 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC8

3.3.3.8.3 Tratamiento y magnitud de las cargas.

Las cargas de frenado se cuantifican de la manera indicada en el apartado de simulación de cargas, y las restantes, reciben el mismo tratamiento que en las situaciones de carga ya analizadas.

3.3.3.9 Frenado en curva rápida en mal estado (SC9).

3.3.3.9.1 Consideraciones

Simula cargas que la unidad soporta mientras realiza una detención con una disminución brusca de su marcha en una curva negociada a alta velocidad. La presente situación es una aproximación al análisis del frenado crítico. Es de interés el estudio del comportamiento de la estructura en circunstancias de frenado en curva para observar su respuesta a fuerzas inerciales.

3.3.3.9.2 Cargas actuantes.

Las cargas cuyas acciones se consideran en el estudio se muestran en el diagrama a continuación

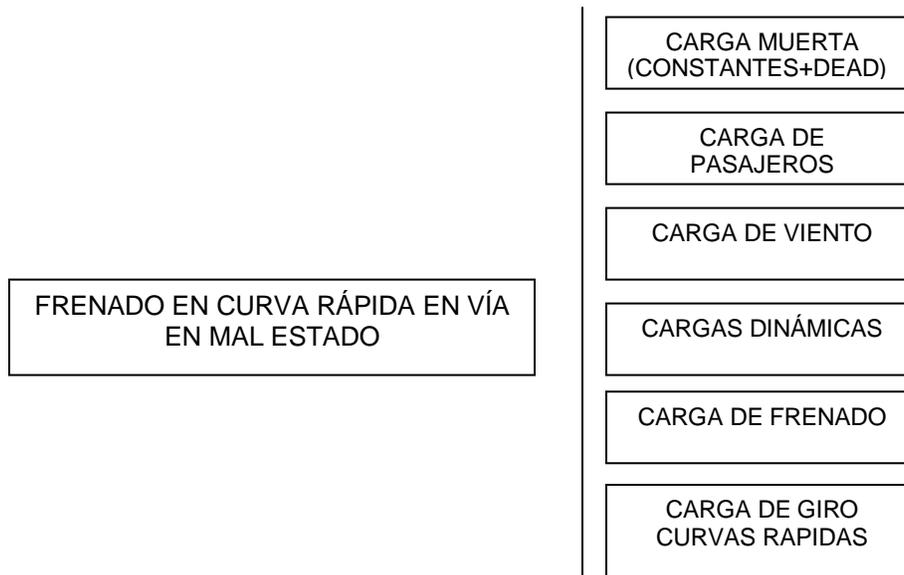


Fig. 3.27 Cargas actuantes en la Situación de Carga SC9

3.3.3.9.3 Tratamiento y magnitud de las cargas.

Las cargas de frenado se cuantifican de la manera indicada en el apartado de simulación de cargas, y las restantes, reciben el mismo tratamiento que en las situaciones de carga ya analizadas.

3.3.3.10 Análisis del combamiento de la estructura con una rueda sin tocar el piso (SC10).

3.3.3.10.1 Consideraciones.

Para simular los efectos del combamiento de la estructura, la situación de carga en análisis estudia el comportamiento de la estructura en situación extrema, cuando una rueda no está en contacto con la vía por la cual transita⁷⁸.

Para efectos del estudio la presente situación considerará las cargas muertas y correspondientes de los pasajeros con la adición de la carga de frenado en línea recta, por considerarse importante la presencia de la misma debido a que en condiciones reales es posible la presencia de la misma. Es de interés conocer el comportamiento de la estructura en cuanto a rigidez torsional, porque, como se analizó en el Capítulo II, de la anotada depende en gran medida el comportamiento de la estructura y de la unidad como un todo⁷⁹, así como el comportamiento de las estructuras del techo y laterales en curvas es de interés especial.

3.3.3.10.2 Cargas actuantes.

Las cargas actuantes consideradas corresponden a cada situación particular, con la condición de análisis indicada

3.3.3.10.3 Tratamiento y magnitud de las cargas.

Por tratarse de situaciones de carga ya analizadas, las cargas reciben el mismo tratamiento que en las situaciones anteriores.

⁷⁸ Ref. [11]

⁷⁹ Ref. [11]

3.3.4 PROCESO DE SIMULACIÓN.

Como se esbozó en páginas anteriores del presente capítulo, una vez definido el modelo matemático se procederá al mallado (mesh) del mismo para la discretización de la estructura y así posibilitar la resolución de las matrices resultantes.

De esta manera se encuentran los esfuerzos a los cuales están sometidos los miembros en particular. La efectividad de la simulación radica en el apego de las condiciones impuestas al modelo con la realidad. Los paquetes de software modernos permiten ajustar la sensibilidad del mallado, permitiendo ahorrar tiempo en procesos iniciales y afinar el proceso para análisis mas detallados.

Cabe destacar que los procedimientos de mallado se realizan con algoritmos propios de los paquetes, consiguiendo resultados óptimos gracias al alto grado de desarrollo de los mismos.

3.4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MODELADO, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

La metodología de modelado de la estructura y simulación de cargas de la carrocería de una unidad de transporte de pasajeros analizada en las páginas anteriores es general en cuanto a su concepción y tratamiento.

La aplicabilidad de tal metodología reside en la particularización de la unidad que se desea analizar para especificar las condiciones que presenta la misma en cuanto a materiales, dimensiones, peso, diseño de estructuras laterales, piso, techo, etc.

Es decir, la aplicación de la metodología diseñada requiere especificar un caso de análisis donde las condiciones que intervienen en el proceso se conozcan y las variables buscadas, en este caso, esfuerzos y zonas de falla, se determinen completamente a través de las condiciones del sistema.

Por lo tanto, de aquí en más, el presente proyecto se referirá a la estructura del autobús Feline fabricado por Miral Buses y al bastidor que sirve de plataforma para su construcción.

3.4.1 ESPECIFICACIONES GENERALES DEL CHASIS PARA LA UNIDAD DE TRANSPORTE FELINE.

Para el estudio del comportamiento de la estructura de la unidad Feline es necesario especificar el bastidor del chasis que la soporta. Dado que Miral construye unidades de transporte en una amplia gama de bastidores, de acuerdo a las exigencias del cliente, y que esta gama incluye marcas de

renombramiento internacional como Mercedes Benz, Scania⁸⁰, Volkswagen, Hino, Nissan Diesel, entre otras, el presente proyecto seleccionará, de acuerdo a las bases de datos de la empresa, el chasis con mayor número de unidades en circulación para el análisis.

De la investigación en las fuentes indicadas⁸¹, se concluye que el chasis con mayor aceptación por parte de los clientes de Miral y cuya necesidad en el análisis estructural es objeto del presente proyecto es el *Mercedes Benz 1721 con distancia entre ejes de 5 950 (mm)*.

Por lo tanto, a continuación se anotan las especificaciones principales del chasis en particular:

Tabla 3.3 Especificaciones generales del chasis de la unidad de transporte Feline de Miral.

MARCA MERCEDES BENZ	
MODELO	OF 1721 / 59
Vehículo	Chasis
Características	Transporte de pasajeros
MOTOR	
Tipo	Diesel Turbo c/ intercamb.
Marca y Modelo	OM 366 LA
Cilindrada(cm3)	5958
Potencia Máxima @ r.p.m.	200 CV @ 2600
Par Motor Max. @ r.p.m.	67 kgm @ 1600
Posicionamiento/Ubicación	Longitudinal / Delantero
TRANSMISIÓN	
Tipo	Manual
Tipo y Mando Embrague	Monodisco Seco Hidroneumático
Cantidad de Velocidades	5 + M.A.

⁸⁰ Con homologación y autorización de ensamble constituyéndose única en el país

⁸¹ Bases de datos de la empresa

Relación Final Eje Trasero	5,857 : 1	
SISTEMA ELECTRICO		
Tabla 3.3 Especificaciones generales del chasis de la unidad de transporte Feline de Miral (Cont).		
DIRECCION		
Accionamiento	Asistida	
SUSPENSION		
Delantera-Tipo	Elásticos	
Trasera-Tipo	Elásticos	
Amortiguadores	4	
FRENOS		
De Servicio, Tipo-Asistencia	Neumáticos Doble Circuito	
Delanteros/Traseros	Tambor / Tambor	
Motor	Sí	
RODADO		
Llanta	Disco 7,50 x 22,5	
Neumáticos	275 / 80 R 22,5 PR 16	
DIMENSIONES		
Largo(mm)	10640	
Ancho(mm)	2451	
Alto(mm)	-	
Distancia entre ejes(mm)	5950	
Capacidad de Combustible(lts)	210	
Carga Útil(kg)	12190	Eje delantero: 3720
		Eje posterior: 8470
Diámetro de Giro(m)	20.1	

Fuente: Mercedes Benz do Brasil

3.4.2 ESPECIFICACIONES Y DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CARROCERÍA Y ESTRUCTURA DE LA UNIDAD DE TRANSPORTE FELINE.

La estructura de la unidad de transporte Feline es un sistema de perfiles de acero estructural unidos mediante soldadura MIG, por lo que se concibe como un sistema estructural de nodos rígidos.

3.4.2.1 Capacidad y dimensiones generales.

La unidad de transporte Feline está diseñada para transportar *43 pasajeros sentados* más tripulante y conductor. A continuación se muestran las dimensiones principales:

Tabla 3.4 Dimensiones generales de la unidad de transporte Feline de Miral.

DIMENSIONES	
Largo total exterior (mm)	12 100
Ancho exterior (mm)	2 540
Altura desde el suelo (mm)	3 500
Área frontal (m ²)	7.99
Área lateral (m ²)	35.40
Área del techo (m ²)	29.97

Fuente: Bases de datos Departamento de Diseño Miral Buses.

3.4.2.2 Especificaciones de perfiles.

A continuación se listan los perfiles comerciales utilizados en la construcción de la unidad de transporte Feline de Miral:

Tabla 3.5 Especificaciones de perfiles de la unidad de transporte Feline de Miral según parte estructural.

UNIDAD ESTRUCTURAL	PERFIL ESTRUCTURAL UTILIZADO ⁸²
PISO	<ul style="list-style-type: none"> - Tubería cuadrada T50x50x3 (mm) - Tubería rectangular T100x50x2 (mm) - Tubería rectangular T100x50x3 (mm)
	<ul style="list-style-type: none"> - Canal de refuerzo C50x25x25x2 (mm)
LATERALES	<ul style="list-style-type: none"> - Tubería cuadrada T50x50x2 (mm) - Tubería cuadrada T50x50x3 (mm)
	<ul style="list-style-type: none"> - Canal de refuerzo C50x25x25x2 (mm) - Riel de refuerzo de asientos 300x40x20x2.5 (mm)
TECHO	<ul style="list-style-type: none"> - Tubería cuadrada T50x25x2 (mm) - Tubería cuadrada T50x50x2 (mm)
	<ul style="list-style-type: none"> - Perfil especial Z.
FRONTAL Y RESPALDO	<ul style="list-style-type: none"> - Tubería cuadrada T40x40x2 (mm) - Tubería cuadrada T25x25x2 (mm)
	<ul style="list-style-type: none"> - Tubería cuadrada T40x40x2 (mm)

⁸² Ver Anexo F para propiedades de secciones y materiales

ESTABILIZADORES Y ANCLAJES AL CHASIS	<ul style="list-style-type: none"> - Canal de anclaje C80x40x6 (mm) - Angulo de soporte L50x50x2 (mm)
--------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Bases de datos Departamento de Diseño Miral Buses.

La tabla siguiente muestra el resumen de los perfiles estructurales utilizados. Se muestra también la materia prima utilizada y la norma observada en su fabricación:

Tabla 3.6 Resumen de perfiles utilizados en la unidad Feline de Miral.

PERFIL	ESPECIFICACIÓN (mm)	MATERIA PRIMA ⁸³	
		TIPO	NORMA
Tubería cuadrada	T25x25x2	Acero laminado en caliente	JIS G-3132 CLASS -1 SPHT - 1
Tubería cuadrada	T40x40x2	Acero laminado en caliente	JIS G-3132 CLASS -1 SPHT - 1
Tubería rectangular	T50x25x2	Acero laminado en caliente	JIS G-3132 CLASS -1 SPHT - 1
Tubería cuadrada	T50x50x2	Acero laminado en caliente	JIS G-3132 CLASS -1 SPHT - 1
Tubería cuadrada	T50x50x3	Acero laminado en caliente	JIS G-3132 CLASS -1 SPHT - 1
Tubería rectangular	T100x50x2	Acero laminado en caliente	JIS G-3132 CLASS -1 SPHT - 1
Tubería rectangular	T100x50x3	Acero laminado en caliente	JIS G-3132 CLASS -1 SPHT - 1
Canal de refuerzo	C50x25x25x2	Acero laminado en caliente	ASTM A-36
Perfil	Z	Acero laminado en caliente	ASTM A-36

⁸³ Ver Anexo F para propiedades detalladas

Fuente: Bases de datos Departamento de Diseño Miral Buses.

Los perfiles listados son los que se considera contribuyen a la resistencia del sistema estructural.

3.4.2.3 Especificaciones de materiales.

La tabla a continuación lista las propiedades mecánicas de los materiales considerados para el presente proyecto:

Tabla 3.7 Propiedades mecánicas de perfiles utilizados en la construcción de la unidad Feline de Miral.

PROPIEDADES MECÁNICAS	
MATERIA PRIMA JIS G-3132 CLASS -1 SPHT - 1	Módulo de elasticidad E = 199 947.98 (N/mm ²)
	Módulo de elasticidad por cortante G = 76 903 (N/mm ²)
	Resistencia a la fluencia Fy = 28 (kgf/mm ²) (mínima) Fy = 274.586 (N/mm ²) (mínima) Fy = 39 825.361 (psi) (mínima)
	Porcentaje de elongación Mínima 32%
	Doblamiento Radio mínimo de curvatura = 4 ϕ del tubo
MATERIA PRIMA ASTM A-36	Módulo de elasticidad E = 199 947.98 (N/mm ²)
	Módulo de elasticidad por cortante G = 76 903 (N/mm ²)
	Resistencia a la fluencia Fy = 25.311 (kgf/mm ²) (mínima) Fy = 248.211 (N/mm ²) (mínima) Fy = 36 000 (psi) (mínima)
	Porcentaje de elongación Mínima 32%

Fuente: Catálogo de propiedades de tubería estructural cuadrada y rectangular Tubos Fuji – Conduit del Ecuador; Bases de datos Departamento de Diseño Miral Buses.

3.4.2.4 Especificaciones de soldadura.

En la construcción de la unidad de transporte de pasajeros Feline de Miral se utiliza el proceso de soldadura eléctrica bajo protección de gas con alimentación continua de electrodo sólido, conocida como Soldadura por Arco de Metal y Gas⁸⁴, el cual emplea un arco entre un electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura.

El proceso se realiza bajo un escudo de gas suministrado externamente, a modo de atmósfera protectora⁸⁵. A continuación se muestran las principales especificaciones del proceso de soldadura utilizado para la construcción de la unidad Feline.

Tabla 3.8 Especificaciones del proceso de de soldadura utilizado en la construcción de la unidad Feline de Miral.

Alambre	Norma AWS ER 70 S-3
Proceso	MIG
Atmósfera de protección	Mezcla de gases (Ar 80%; CO ₂ 20%)
Resistencia a la tracción	74 000 (psi) 510.212 (N/mm ²)
Elongación	34%

Fuente: Bases de datos Departamento de Diseño Miral Buses.

3.4.3 GENERACIÓN DE LA GEOMETRÍA COMPLETA DE LA ESTRUCTURA.

⁸⁴ Su traducción y siglas en inglés son Gas Metal Arc Welding (GMAW).

⁸⁵ Ref. [28]. Para información ampliada referirse al Anexo A.

Por conveniencia se prioriza en esta sección el modelado con AutoCAD 2006 y la simulación con SAP2000 por considerarse procedimientos generales aplicables a las herramientas disponibles y por abarcar gran parte del alcance del proyecto.

3.4.3.1 Condiciones particulares para el modelado de la estructura de la unidad Feline de Miral.

- Todos los elementos tubulares que constituyen estructura se tienen en cuenta para su modelado.
- Todas las uniones entre los elementos tubulares se consideran rígidas.
- El bastidor del chasis se considera en el modelado.
- La estructura se une rígidamente el bastidor y los apoyos de la suspensión se consideran fijos en traslación y rotación.
- Dado que los elementos de la carrocería están constituidos de acero estructural JIS-G3132⁸⁶, se considera a los mismos como elásticos lineales.
- Cada nodo tiene seis grados de libertad.
- Se consideran tanto cargas de naturaleza estática⁸⁷ como cargas de naturaleza dinámica⁸⁸.
- Bajo la aplicación de cargas la variación de la geometría de la estructura será pequeña.

3.4.3.2 Esquematización bidimensional en AutoCAD 2006

Para el modelado tridimensional de la estructura de la unidad Feline, es necesario partir del análisis de los planos bidimensionales disponibles en los archivos del departamento de ingeniería de Miral.

⁸⁶ De características similares a la norma ASTM A501

⁸⁷ Fuerzas concentradas sobre los nodos, constantes del tiempo.

⁸⁸ Cargas variables en el tiempo y en su frecuencia de aplicación, actuantes en el plano de las restricciones.

Se deben identificar las partes principales de la carrocería⁸⁹, así como las partes de la estructura⁹⁰ y la conectividad de cada elemento de la estructura en el espacio. Es decir, se debe analizar como se conectan los miembros, cuales son sus puntos de inicio, final y cual es su ubicación en el espacio.

A continuación se observa un esquema de los planos bidimensionales de la unidad Feline sobre un bastidor Mercedes – Benz 1721\59.

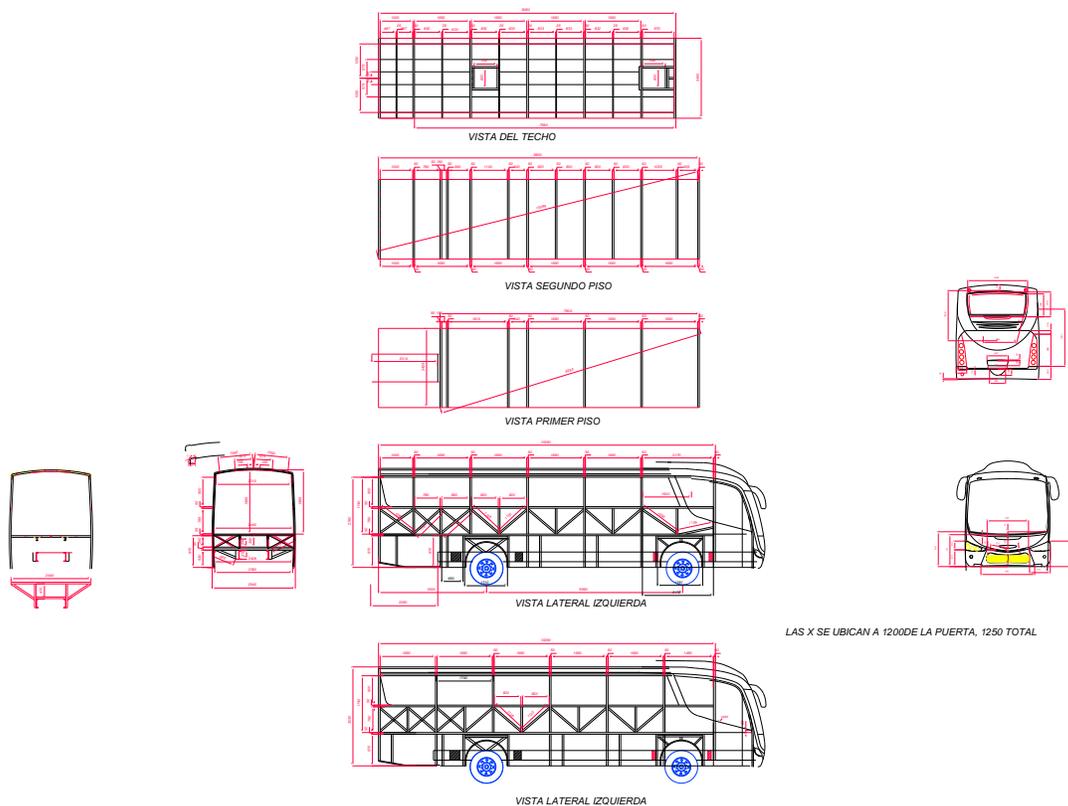


Fig. 3.28 Planos de la estructura de la carrocería Feline de Miral.

3.4.3.3 Modelado tridimensional con AutoCAD 2006.

⁸⁹ Véase Capítulo 2, inciso 2.1.4.1

⁹⁰ Véase Capítulo 2, inciso 2.1.4.6

Partiendo del análisis de los levantamientos bidimensionales se construye la estructura unifilar de la carrocería en tres dimensiones con la ayuda de herramientas 3D del software de modelado AutoCad versión 2006. Se hace uso extensivo de herramientas de modelado en tres dimensiones para alcanzar la geometría deseada. Es necesaria la construcción la estructura de esta manera por la conveniencia de aplicación en el software estructural SAP2000.

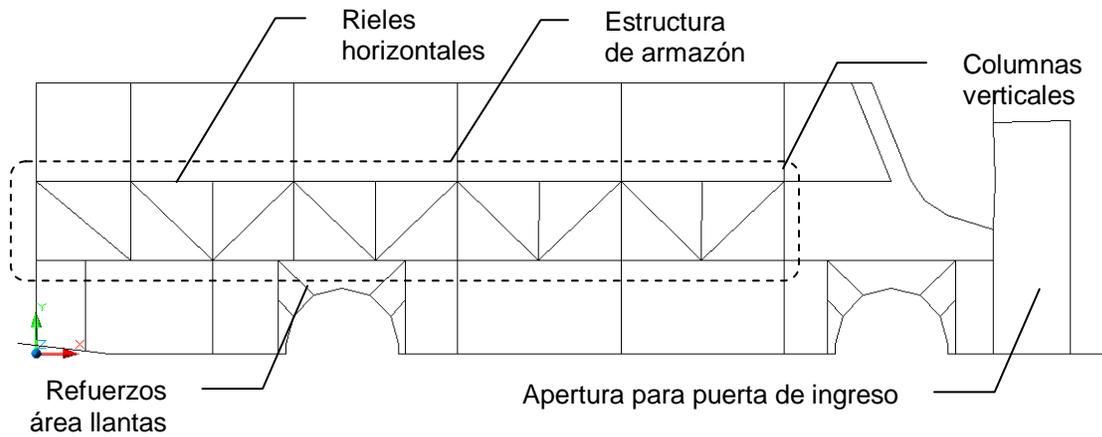


Fig. 3.29 Geometría de estructura lateral derecha

Dada la gran cantidad de elementos que componen la estructura, es necesaria la observación de campo que permita asegurar la correcta conexión de los elementos constitutivos de cada parte. A continuación se muestra la estructura modelada de acuerdo a sus partes constitutivas y el modelo final:

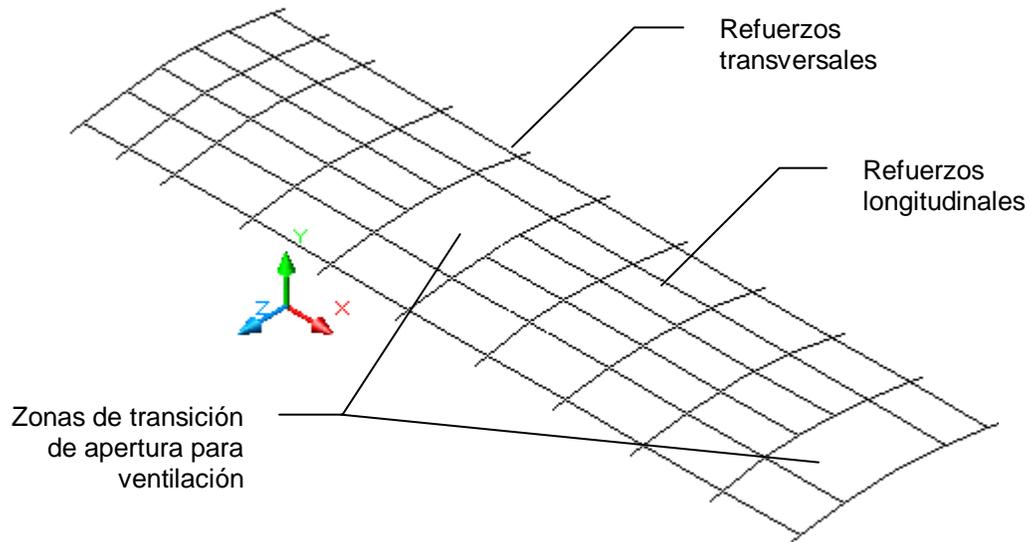


Fig. 3.30 Geometría de estructura del techo de la unidad

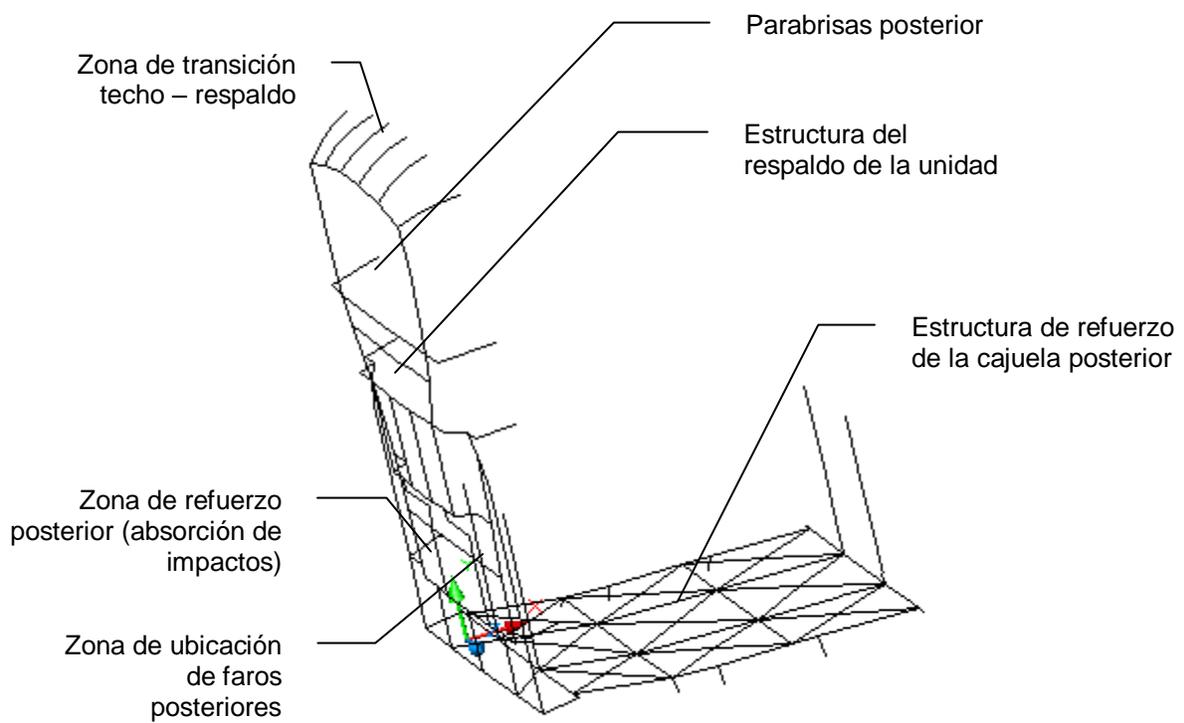


Fig. 3.31 Geometría de estructura del respaldo y de cajuela posterior de la unidad Feline de Miral

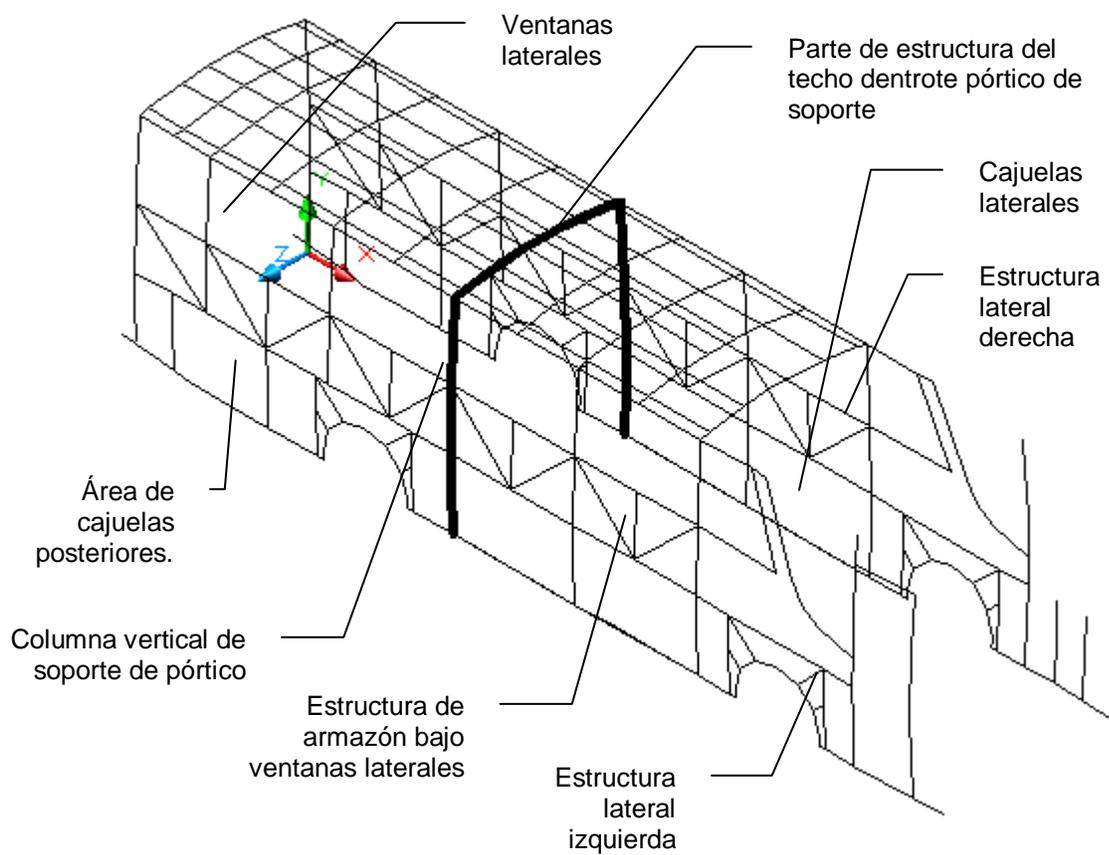


Fig. 3.32 Geometría de estructuras laterales y partes principales de la estructura de pórticos de soporte de la unidad

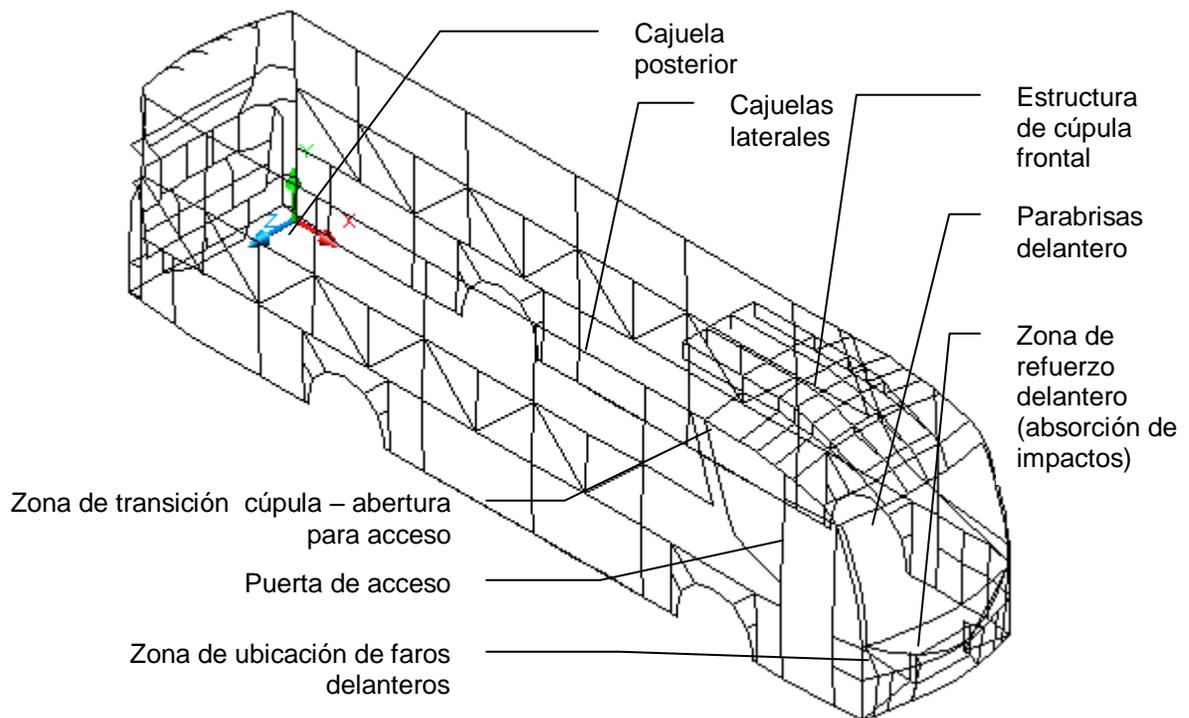


Fig. 3.33 Geometría de estructura frontal y ensamble de estructuras laterales con frontal y respaldo (no se muestra el techo ni el piso por simplicidad)

3.4.4 ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES DE MATERIALES CONSTITUTIVOS DE MIEMBROS DE LA ESTRUCTURA. ANÁLISIS GLOBAL DE LA ESTRUCTURA

El análisis global de la estructura se realizará, como se indicó en páginas anteriores, en el software especializado SAP2000. Para ello se requiere las propiedades de los materiales empleados en la construcción para el modelado de la unidad⁹¹:

Tabla 3.9 Propiedades mecánicas de materiales utilizados en la construcción de la unidad Feline de Miral.

PROPIEDADES MECÁNICAS	
JIS G-3132 CLASS -1 SPHT - 1	Módulo de elasticidad $E = 199\,947.98 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
	Módulo de elasticidad por cortante $G = 76\,903 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
	Resistencia a la fluencia $F_y = 274.586 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ (mínima)
	Resistencia ultima $F_u = 310.264 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
	Densidad $\delta = 7\,850 \text{ (kg/m}^3\text{)} = 7.85\text{E-6 (kg/mm}^3\text{)}$ $\delta = 7.85 \text{ (N.s}^2\text{/mm}^4\text{)}$
	Peso específico $\gamma = 7.698 \text{ (N/mm}^3\text{)}$
	Coeficiente de Poisson $\mu = 0.3$
	ASTM A-36
Resistencia a la fluencia $F_y = 248.211 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ (mínima)	
Resistencia ultima	

⁹¹ Ref. [16, 17, 18]

	Fu = 399.896 (N/mm ²)
--	-----------------------------------

Fuente: Catálogo de propiedades de tubería estructural cuadrada y rectangular Tubos Fuji – Conduit del Ecuador; Manual Marks del Ingeniero Mecánico.

Las propiedades listadas anteriormente se ingresan en SAP2000 en el menú Define/Materials:

Fig. 3.34 Ingreso de propiedades de material JIS G-3132 en SAP2000

3.4.5 ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES GEOMÉTRICAS A MIEMBROS PARTICULARES CONSTITUTIVOS DE LA ESTRUCTURA EN SAP2000⁹²

⁹² Para diferentes programas los métodos de asignación de secciones pueden variar

Dado que las propiedades de los perfiles con los cuales se construye la unidad Feline no se encuentran en las librerías de propiedades de materiales del software, es necesario cargar las mismas de manera manual, con lo cual se consigue generar el perfil indicado para cada aplicación. Este procedimiento se lo realiza desde el menú *Define/Frame sections*, donde es posible obtener las secciones necesarias. La figura a continuación muestra las secciones necesarias para el proyecto cargadas en el menú de selección de propiedades:

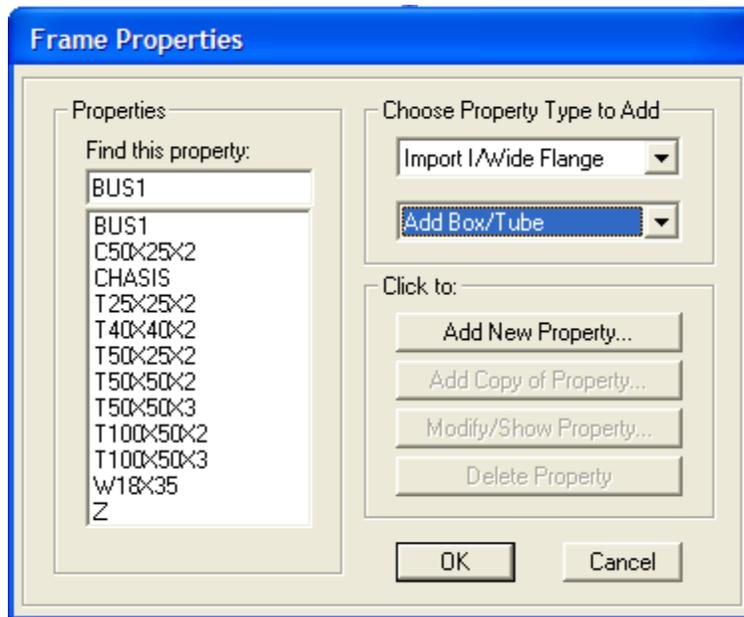


Fig. 3.35 Ingreso de propiedades de secciones transversales en SAP2000

El ingreso de datos se realiza en los campos señalados para el caso. Para ejemplificar el caso del ingreso del perfil T50X50X2 se tiene:

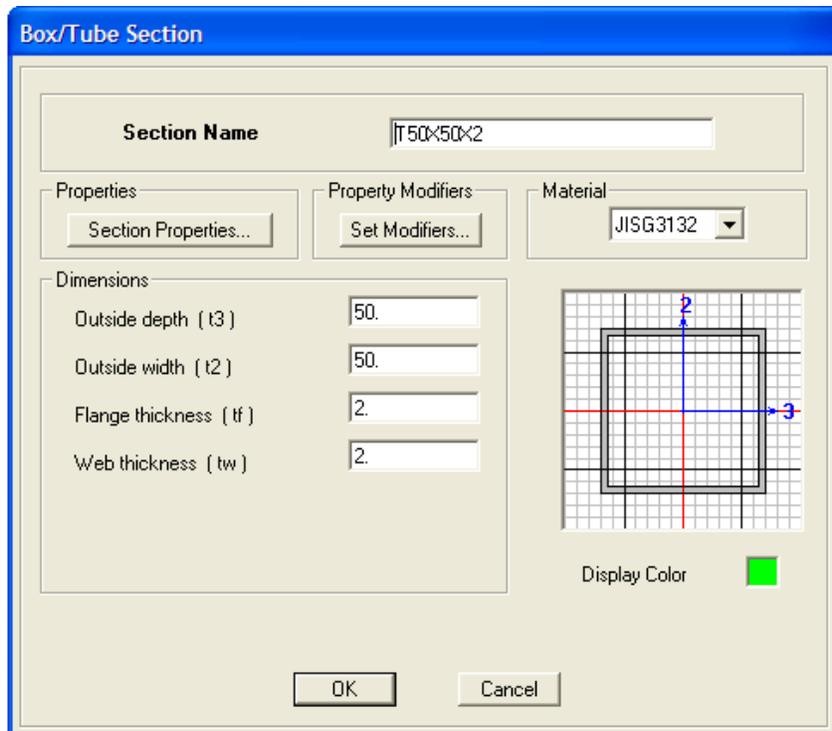


Fig. 3.36 Ingreso de propiedades de tubo T50X50X2

Una vez cargados los perfiles se procede a importar el modelo generado en AutoCad mediante el menú *File/Import/AutoCAD.dxf file* para inmediatamente asignarles la propiedad geométrica correspondiente mediante el comando *Assign frame sections*.

En la figura siguiente se observan los refuerzos laterales (sin las columnas) y la estructura del techo con sus perfiles correspondientes.

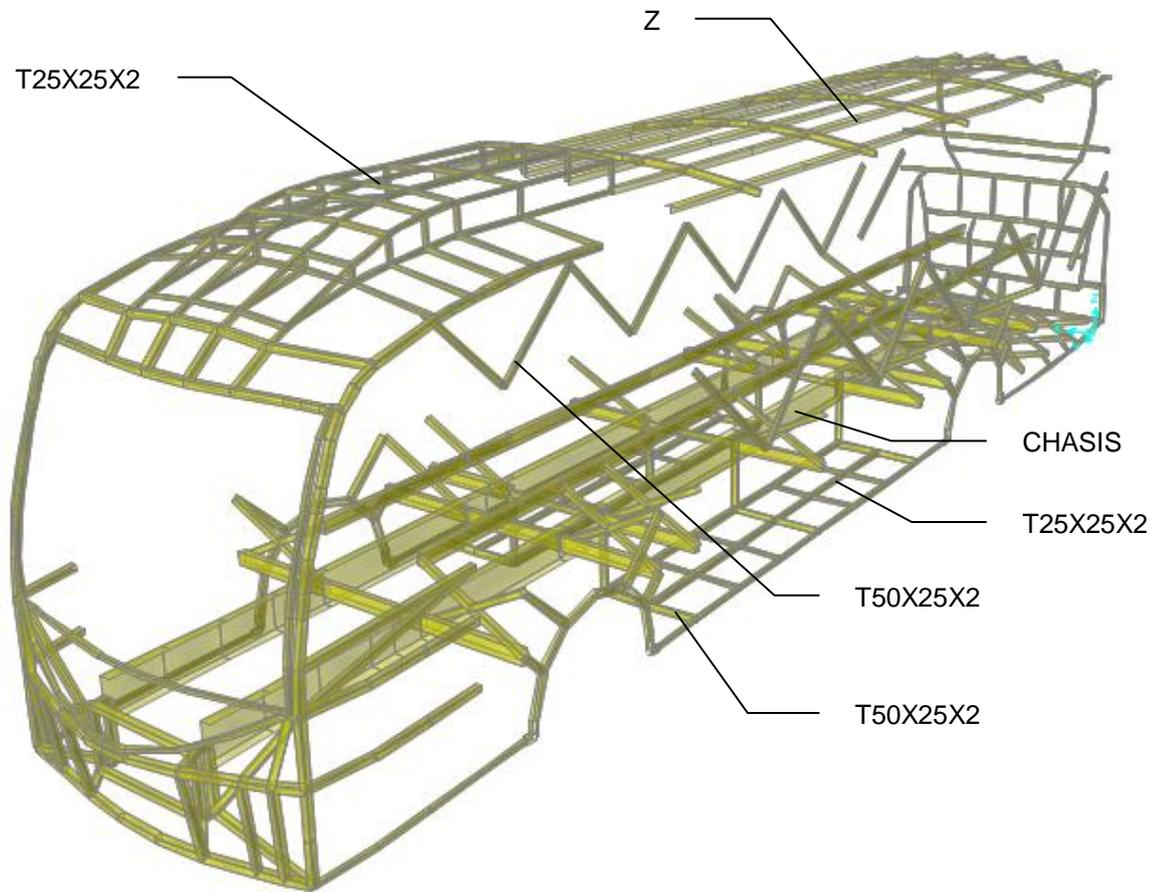


Fig. 3.37 Importación de la estructura media de la unidad Feline en SAP2000

La parte posterior del modelo presenta particularidades en cuanto a geometría y propiedades de estabilizadores de cajuelas y de conjunto por lo que se detallan sus secciones. Se puede observar también el piso de las cajuelas posterior y lateral izquierda modelados con elementos *shell*:

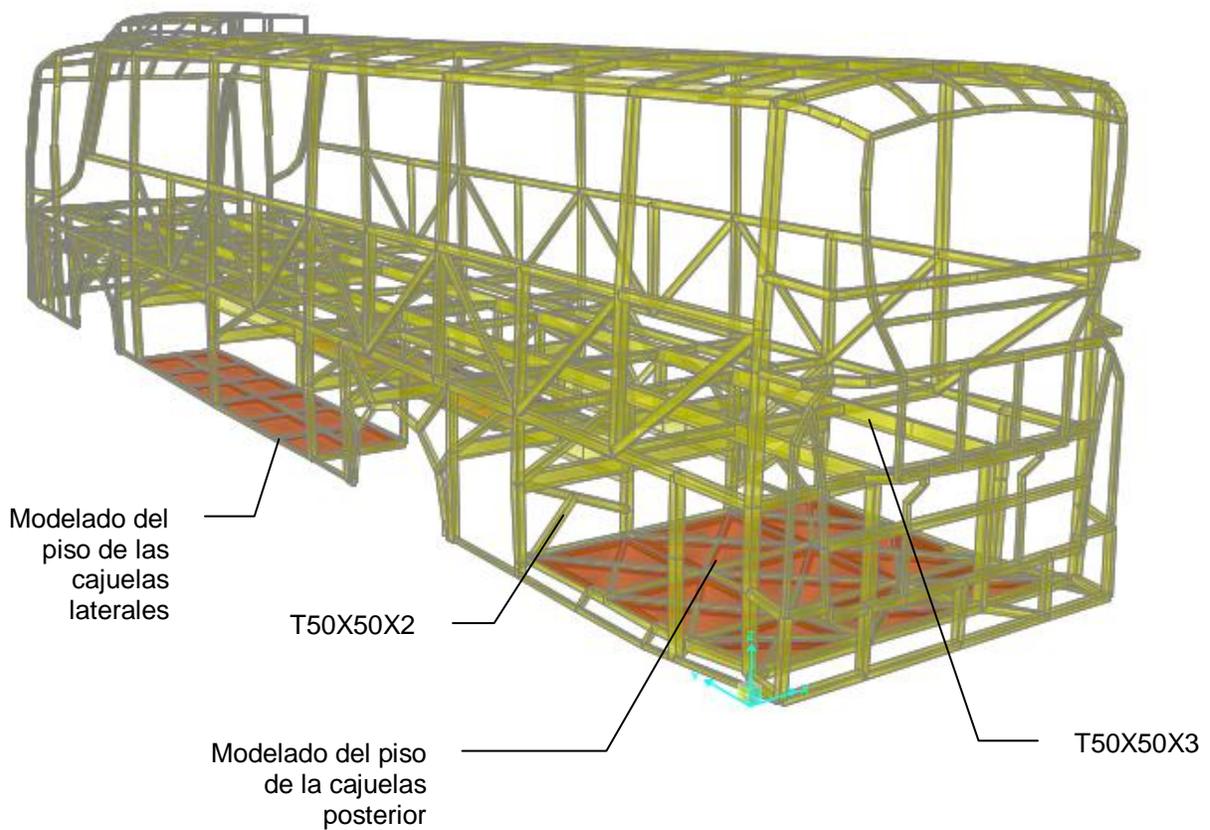


Fig. 3.38 Importación de la estructura posterior de la unidad Feline en SAP2000

La siguiente figura muestra la disposición de los elementos de la estructura desde una perspectiva interior. Cabe destacar la ubicación delantera del motor con la aproximación adoptada para el presente proyecto (4 puntos de sujeción) y la estructura de piso del habitáculo del conductor:

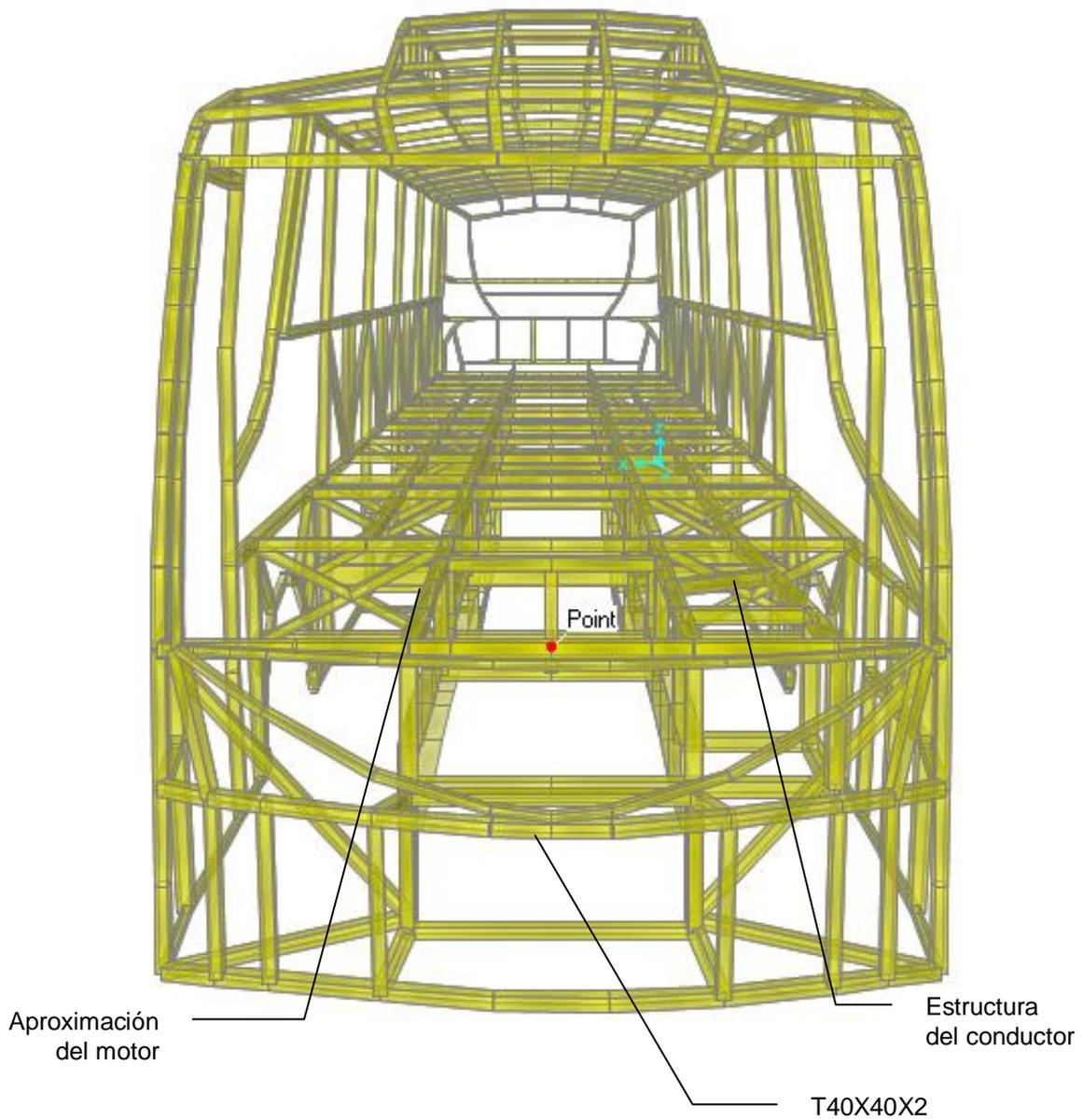
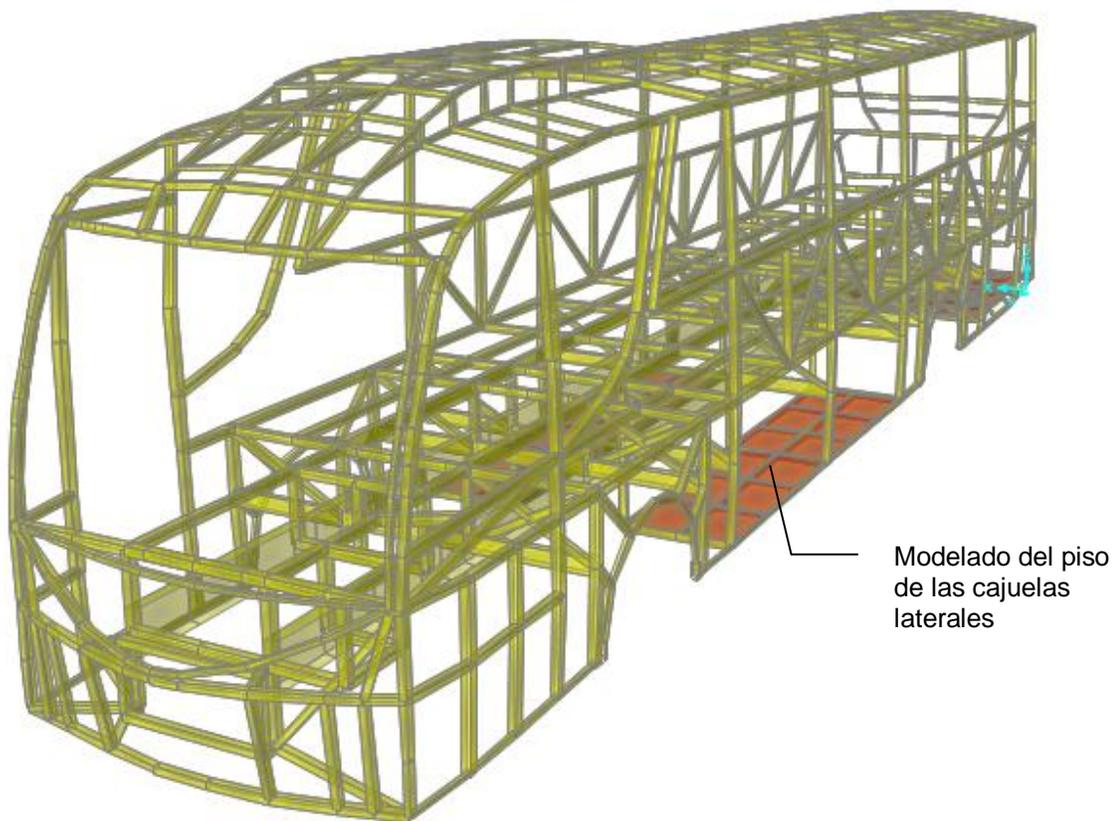


Fig. 3.39 Vista frontal en perspectiva del modelo importado en SAP2000

La figura a continuación representa el modelo matemático de la unidad de transporte Feline construido para la simulación de estados de carga. Cabe señalar la importancia de incluir perfiles cuyas propiedades sean representen fielmente los utilizados en la construcción. Nótese el piso de las cajuelas en los que se ha incluido elementos *shell*⁹³ para su representación por considerar que aportan resistencia. Bajo la misma consideración, se ha omitido el modelado del piso del habitáculo.



⁹³ Elementos de dibujo de placas que representan laminas planas

Fig. 3.40 Vista en perspectiva del modelo matemático representativo de la unidad Feline en SAP2000

3.4.6 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE DEL MODELO

La estructura de la carrocería está unida al bastidor del chasis mediante soldadura, por lo que forman una sola unidad estructural⁹⁴. Del mismo modo, la suspensión de la unidad mantiene unido la unidad estructural al tren motriz del autobús. Del análisis del sistema se observa que la unión no presenta grados de libertad, por lo que aproximara como un empotramiento a la suspensión.

Para simular tal condición en software de simulación y análisis se recurre a la herramienta *Joint restraints*, que simula condiciones de borde en nodos y que en SAP2000 presenta la opción de realizar empotramientos:

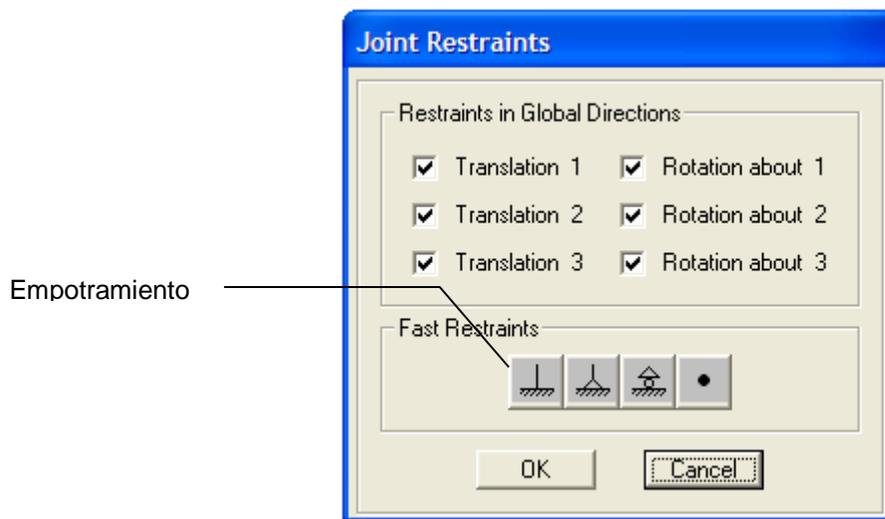


Fig. 3.41 Condiciones de borde en SAP2000

La siguiente figura muestra los apoyos utilizados en la simulación de la unidad Feline. Las medidas de los anclajes de la suspensión al bastidor del chasis se tomaron directamente:

⁹⁴ Véase Capítulo 2, inciso 2.1.4.3

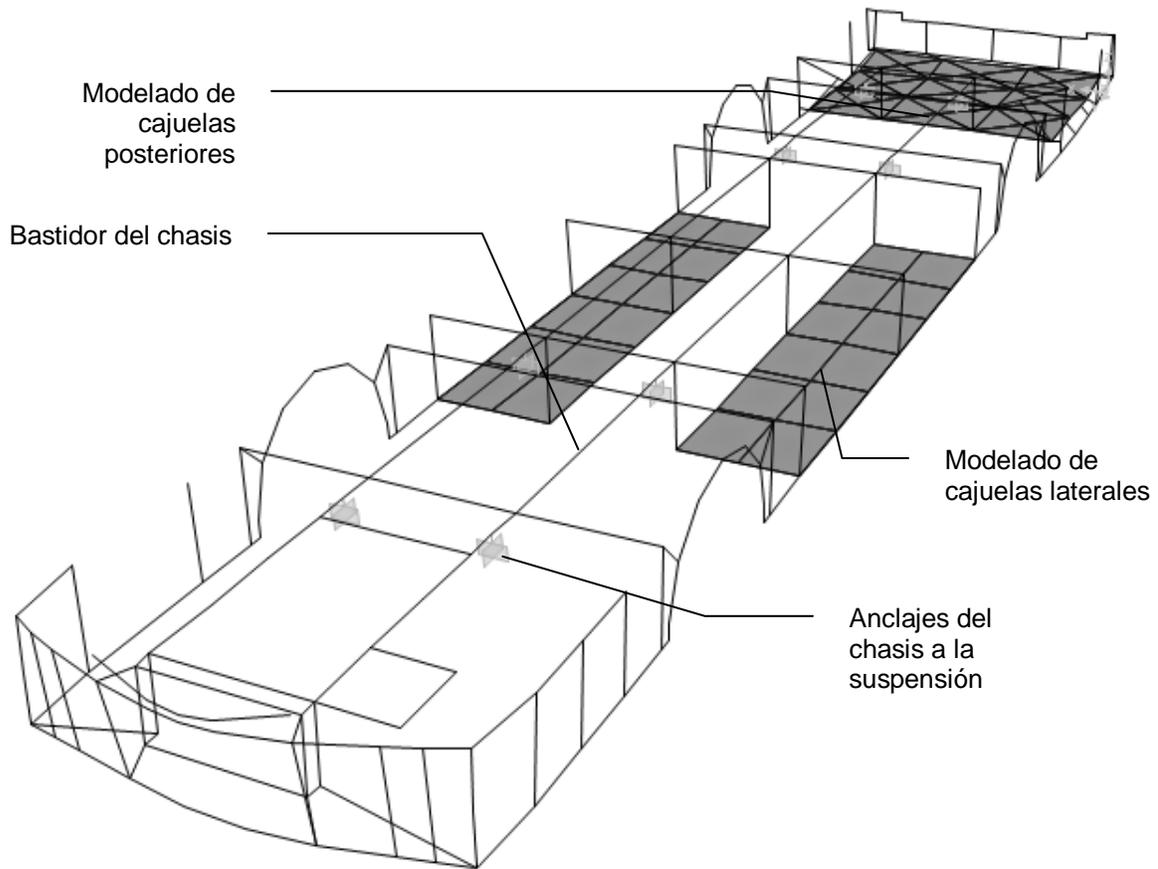


Fig. 3.48 Condiciones de borde del modelo matemático de la unidad Feline

3.4.7 ESTABLECIMIENTO Y SIMULACIÓN DE CARGAS ACTUANTES

3.4.7.1 Cargas constantes.

Como se analizó en 3.3.2.1, las cargas constantes vienen dadas por el peso propio de la estructura y las cargas muertas que soporta por los componentes necesarios para su operación. A continuación se detallan las cargas muertas consideradas para la simulación:

Cálculo de cargas en cajuelas⁹⁵.

Es necesario proporcionar los siguientes datos para el cálculo de cargas en cajuelas. Los datos se tomaron tanto de medidas físicas como del modelo matemático generado:

DIMENSIONES

Area del techo de la carroceria	$a_{\text{techo}} := 29.97$	(m^2)
Area frontal de la carroceria	$a_{\text{frontal}} := 7.99$	(m^2)
Volumen cajuelas laterales	$V_{\text{cajuela_lateral}} := 6.736$	(m^3)
Volumen cajuela posterior	$V_{\text{cajuela_posterior}} := 4.801$	(m^3)

Con los datos mencionados se procede al cálculo de las cargas particulares:

Carga de cajuelas laterales	$q_{\text{cajuela_lateral}} := 1000 V_{\text{cajuela_lateral}}$	
	$q_{\text{cajuela_lateral}} = 6736$	(N)
Carga de cajuela posterior	$q_{\text{cajuela_posterior}} := 1000 V_{\text{cajuela_posterior}}$	
	$q_{\text{cajuela_posterior}} = 4801$	(N)
Carga sobre techo	$q_{\text{techo}} := 750 a_{\text{techo}}$	
	$q_{\text{techo}} = 22477.5$	(N)

⁹⁵ Carga exigida por normativas, ver 3.3.2.1, Ref. [1,2]

En 3.3.2.1 se esbozó las cargas que se considerarán para el análisis de la unidad Feline. A continuación se presentan los valores que adoptarán las mismas:

Tabla 3.10 Cargas exigidas por normativos que consideran en el análisis de la unidad Feline de Miral.

CARGAS POR NORMAS INTERNACIONALES		
ITEM	VALOR (kg)	VALOR (N)
Carga de cajuela lateral	673.6	6736
Carga de cajuela posterior	480.1	4801
Carga sobre la parrilla del techo	2247.75	22477.5

Fuente: Reglamentos 36 y 66 UNECE.

Tabla 3.11 Cargas del tren de potencia.

CARGAS TREN DE POTENCIA		
ITEM	VALOR (kg)	VALOR (N)
Peso de motor	1170	11700
Peso de la caja de cambios y sistema de transmisión	200	2000
Peso del sistema de dirección	140	1400
Peso del sistema de embrague	80	800
Peso del bastidor del chasis	480	4800

Fuente: MERCEDES BENZ, Chasis OF 1721 Especificaciones, traducido del inglés, Brasil 2004

Tabla 3.12 Cargas necesarias para el funcionamiento de la unidad.

CARGAS DE FUNCIONAMIENTO		
ITEM	VALOR (kg)	VALOR (N)
Peso total de los asientos (N)	1290	12900
Peso del tanque de combustible	300	3000
Peso del radiador	60	600
Peso de los neumáticos (incluido repuesto)	840	8400
Peso de las baterías	150	1500
Peso del compresor y tanques de aire comprimido	100	1000
Peso del sistema de aire acondicionado	200	2000
Peso de sistema de calentamiento	700	7000
Peso del parabrisas delantero	100	1000
Vidrio posterior	50	500

Fuente: MERCEDES BENZ, Chasis OF 1721 Especificaciones, traducido del inglés, Brasil 2004

Tabla 3.13 Carga total actuante sobre la unidad de transporte Feline de Miral.

CARGA TOTAL (N)	
PESO DE LA ESTRUCTURA	24 725.90
CARGAS NORMA	40 750.50
CARGAS TREN DE POTENCIA	15 900.00
CARGAS DE FUNCIONAMIENTO	37 900.00
	119 276.40

La tabla anterior muestra el total de carga constante que debe soportar el conjunto chasis – carrocería como un todo. El peso de la estructura, sin considerar ningún elemento fuera de los constitutivos de la misma, es de 2472.6 (kg). El dato se obtuvo del modelo matemático importado a SAP200 donde se realizó una corrida inicial para averiguar el peso propio de la estructura (reacciones sin carga externa). El peso constante que actúa sobre la estructura, considerando su peso propio es de 11 927.7 (kg).

Tabla 3.14 Clasificación de las cargas de funcionamiento por su ubicación (para facilitar su ingreso en software especializado).

CARGAS DE FUNCIONAMIENTO	
DISTRIBUIDAS	12 900.00
INTERMEDIAS	21 900.00
DELANTERAS	2 600.00
POSTERIORES	500.00

El ingreso de las cargas en los programas especializados de análisis se realiza por nodos, por lo que se debe dividir la carga total a ser aplicada para el número de nodos considerados en la zona de aplicación.

3.4.7.2 Cargas viajeros.

Las cargas vivas, como se analizó en 3.3.2.2, constituyen para el presente proyecto el peso de pasajeros y tripulación. Como caso extremo, y dado que las restricciones para viajeros de pie no se cumplen a cabalidad, se considerará que

la unidad transporta 43 viajeros sentados y 25 de pie más tripulación. A continuación se muestra los valores de simulación:

Tabla 3.15 Cargas vivas analizadas

ITEM	VALOR (kg)	VALOR (N)
Peso por pasajero	75	750
Peso conductor	75	750
Peso tripulante	75	750
TOTAL CARGAS VIVAS	5250	52500

3.4.7.3 Cargas dinámicas.

Según el análisis efectuado en 3.3.2.3, las cargas dinámicas consideradas en el presente proyecto presenta valores pico mostrados en la fig. 3.10; el ingreso de las mismas, al ser variables en el tiempo, se realiza mediante el comando *Assign/Function* en el menú principal de SAP2000, que admite pares de valores de la función de carga.

3.4.7.4 Carga de resistencia del viento.

Atendiendo el análisis realizado en 3.3.2.4, a continuación se calcula la carga resistiva generada por el viento contrario al movimiento según los datos:

Coefficiente de resistencia al avance	$C_D := 0.5$	
Densidad del aire	$\rho := 1.225$	$\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$
Area frontal de la carroceria	$a_f := 7.99$	$\left(\text{m}^2\right)$
Velocidad de traslación del vehículo	$V_t := 100$	$\left(\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)$

Aplicando la ecuación 3.5 se tiene

$$\text{Fuerza de resistencia ejercida por la masa de aire} \quad D := C_D \cdot \rho \cdot a_f \left(\frac{V_t}{3.6}\right)^2$$

$$D = 3776.138 \quad (\text{N})$$

Numero de nodos en los que se va a aplicar la carga $n_v := 47$

$$\text{Carga aplicada por nodo} \quad D_n := \frac{D}{n_v}$$

$$D_n = 80.343 \quad (\text{N})$$

Se calcula la carga nodal D_n para su aplicación en los nodos seleccionados del frente del modelo matemático.

3.4.7.5 Cálculo del centro de gravedad total.

Antes del cálculo del resto de cargas es necesario calcular el centro de gravedad de la unidad con los datos y procedimientos descritos a continuación⁹⁶; los datos iniciales son los siguientes:

⁹⁶ Ref. [5]

Distancia entre ejes	$W_B := 5950$	(mm)
Peso eje delantero	$W_f := 3720$	(kg)
Saliente de masa de la carrocería	$L := \frac{W_f W_B}{1000M}$	
	$L = 1.938$	(m)

La siguiente tabla resume las propiedades de la estructura por partes. Los datos fueron tomados de modelos reales:

Tabla 3.16 Masas de la estructura por partes.

CONSTRUCCIÓN	Masa (kg)	Altura (m)	Momento (kg.m)
FRONTAL	270.80	0.50	135.40
TECHO	380.00	2.00	760.00
LATERALES	778.76	0.50	389.38
RESPALDO	211.00	0.50	105.50
PISO	326.80	0.10	32.68
ASIENTOS	1290.00	0.40	516.00
TOTAL	3257.36	0.60	1938.96

Altura del centro de gravedad desde el bastidor $H_B := \frac{1938.96}{3257.36}$

$H_B = 0.595$ (m)

Altura del neumático delantero cargado $H_F := 0.79$ (m)

Altura del neumático trasero cargado $H_R := 0.793$

Altura de la superficie del bastidor al piso $H_C := H_R - \frac{L}{W_B} \cdot (H_R - H_F)$

$H_C = 0.793$

Altura del centro de gravedad de la carrocería $H_D := H_B + H_C$

$H_D = 1.388$ (m)

Tabla 3.16 Cálculo del centro de gravedad del conjunto chasis - bastidor.

	ALTURA DEL CENTRO DE GRAVEDAD DESDE EL SUELO (m)	MASA (kg)	MOMENTO (kg.m)
CHASIS	1.10	12190.00	13409.00
CARROCERÍA	1.39	11244.00	15606.67
TOTAL	1.24	23434.00	29015.67

Altura del centro de gravedad total

$$H := \frac{29015.672}{23434}$$

$$H = 1.238 \quad (\text{m})$$

3.4.7.6 Carga de frenado violento.

De acuerdo a lo analizado en 3.3.2.5, la fuerza retardadora máxima es igual al peso propio de la unidad. Aplicando la ecuación 3.11 con ciertos pasos anteriores se tiene:

$$\text{Aceleracion de la gravedad} \quad a_g := 10 \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

$$\text{Peso de la unidad (cargas constantes)} \quad P_C := 119276.40 \quad (\text{N})$$

$$\text{Peso de la unidad (cargas viajeros)} \quad P_V := 52500 \quad (\text{N})$$

$$\text{Peso total de la unidad} \quad P := P_C + P_V \quad (\text{N})$$

$$P = 171776.4 \quad (\text{N})$$

$$\text{Masa total de la unidad} \quad M := \frac{P}{10}$$

$$M = 17177.64 \quad (\text{kg})$$

$$\text{Fuerza de frenado} \quad f_r := M \cdot a_g$$

$$f_r = 171576.79 \quad (\text{N})$$

$$\text{Numero de nodos en los que se va a aplicar la carga} \quad n_f := 18$$

$$\text{Carga aplicada por nodo} \quad f_{r_n} := \frac{f_r}{n_f}$$

$$f_{r_n} = 9532.044 \quad (\text{N})$$

Por definición, las cargas de frenado actúan a la altura del centro de gravedad de la unidad. Se necesita trasladarlas a los nodos de unión con el piso para tener concordancia con la teoría analizada en el Capítulo 2.

Por lo tanto se plantea la siguiente ponderación de cargas partiendo de la altura del centro de gravedad desde el bastidor de 595 (mm). Dado que la distancia desde el piso al bastidor es de 425 (mm), la altura del centro de gravedad desde el piso será de $595 - 425 = 170$ (mm).

La figura a continuación muestra una columna principal con la medida desde el suelo al techo:

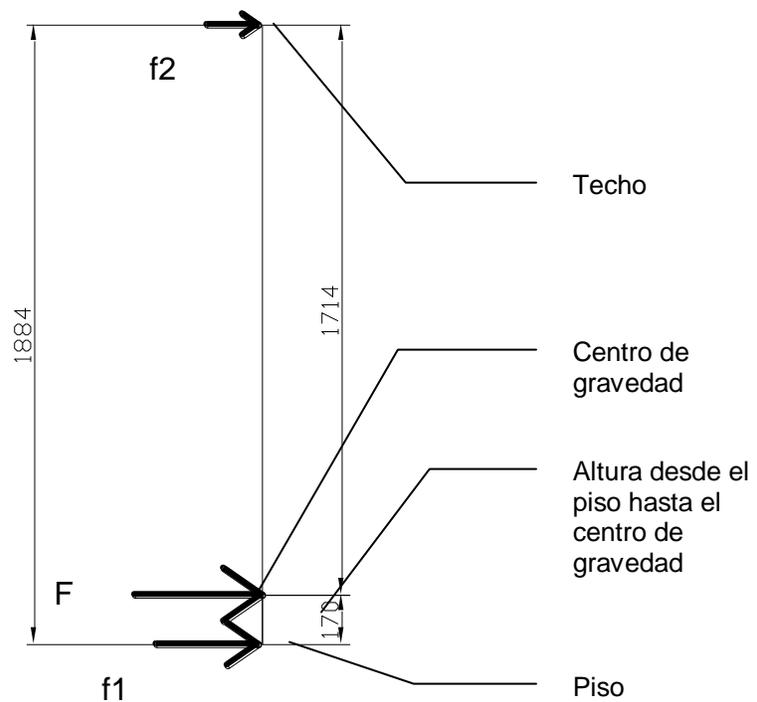


Fig. 3.49 Esquema de columna y ubicación de centro de gravedad

Dado que se tienen las distancias, la ponderación de cargas para mover su punto de aplicación y obtener cargas equivalentes aplicadas en los nodos será:

$$f_1 = F \cdot \left(\frac{1714}{1884} \right) \quad 3.18$$

$$f_2 = F \cdot \left(\frac{170}{1884} \right) \quad 3.19$$

Aplicando los factores de ponderación a las cargas calculadas se tiene:

Carga nodal inferior

$$f_{r_n_1} := f_{r_n} \cdot \left(\frac{1714}{1884} \right)$$

$$f_{r_n_1} = 8671.934 \quad (\text{N})$$

Carga nodal superior

$$f_{r_n_2} := f_{r_n} \cdot \left(\frac{170}{1884} \right)$$

$$f_{r_n_2} = 860.11 \quad (\text{N})$$

3.4.7.7 Carga de aceleración violenta.

De acuerdo a lo analizado en 3.3.2.6, y dado que las fuerzas de fricción de aceleración tienen la misma naturaleza que las fuerzas de fricción en el frenado puesto se trata del mismo compuesto de caucho sobre el asfalto, la fuerza máxima correspondiente a una aceleración violenta es igual al peso propio de la unidad. Aplicando la ecuación 3.16:

Fuerza de aceleracion

$$f_a := M \cdot a_g$$

$$f_a = 171576.79 \quad (\text{N})$$

Numero de nodos en los que se va a aplicar la carga $n_a := 18$

Carga aplicada por nodo

$$f_{a_n} := \frac{f_a}{n_a}$$

$$f_{a_n} = 9532.044 \quad (\text{N})$$

Carga nodal inferior

$$f_{a_n_1} := f_{a_n} \cdot \left(\frac{1714}{1884} \right)$$

$$f_{a_n_1} = 8671.934 \quad (\text{N})$$

Carga nodal superior

$$f_{a_n_2} := f_{a_n} \cdot \left(\frac{170}{1884} \right)$$

$$f_{a_n_2} = 860.11 \quad (\text{N})$$

3.4.7.8 Carga de giro.

Se tienen dos casos de estudio para cargas de giro. Para detalles de los mismos referirse a 3.3.2.7. Empleando la ecuación 3.17 se tiene:

3.4.7.8.1 Carga de giro en curvas amplias

Velocidad de traslación en curva amplia $V_{ca} := 40 \left(\frac{\text{km}}{\text{h}} \right)$

Radio de curvatura $r_{ca} := 25 \text{ (m)}$

Ancho total de la unidad $a := 2.540 \text{ (m)}$

Radio de curvatura nodos interiores $r_{ca_i} := r_{ca} - \frac{a}{2}$
 $r_{ca_i} = 23.73 \text{ (m)}$

Radio de curvatura nodos exteriores $r_{ca_e} := r_{ca} + \frac{a}{2}$
 $r_{ca_e} = 26.27 \text{ (m)}$

Fuerza producida por curva amplia $F_{ca} := M \cdot \frac{\left(\frac{V_{ca}}{3.6} \right)^2}{r_{ca}}$
 $F_{ca} = 84729.279 \text{ (N)}$

Numero total de nodos en los que se va a aplicar la carga (estructura lateral interior y exterior a la curva por consideracion de simetria) $n_{ca_i} := 18$

Carga aplicada por nodo interno a la curva

$$F_{ca_ni} := \frac{F_{ca}}{n_{ca_i}} \cdot \frac{r_{ca}}{r_{ca_i}}$$

$$F_{ca_ni} = 4959.105 \text{ (N)}$$

Carga nodal inferior

$$f_{ca_n_1} := F_{ca_ni} \cdot \left(\frac{1714}{1884} \right)$$

$$f_{ca_n_1} = 4511.627 \text{ (N)}$$

Carga nodal superior

$$f_{ca_n_2} := F_{ca_ni} \cdot \left(\frac{170}{1884} \right)$$

$$f_{ca_n_2} = 447.478 \text{ (N)}$$

Carga aplicada por nodo externo a la curva

$$F_{ca_ne} := \frac{F_{ca}}{n_{ca_e}} \cdot \frac{r_{ca}}{r_{ca_e}}$$

$$F_{ca_ne} = 4479.618 \text{ (N)}$$

Carga nodal inferior (exterior curva)

$$f_{ca_n_11} := F_{ca_ne} \cdot \left(\frac{1714}{1884} \right)$$

$$f_{ca_n_11} = 4075.406 \text{ (N)}$$

Carga nodal superior (exterior curva)

$$f_{ca_n_22} := F_{ca_ne} \cdot \left(\frac{170}{1884} \right)$$

$$f_{ca_n_22} = 404.212 \text{ (N)}$$

3.4.7.8.2 Carga de giro en curvas estrechas

Velocidad de traslación en curva rápida	$V_{cr} := 45$	$\left(\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)$
Radio de curvatura	$r_{cr} := 20$	(m)
Radio de curvatura nodos interiores	$r_{cr_i} := r_{cr} - \frac{a}{2}$ $r_{cr_i} = 18.73$	(m)
Radio de curvatura nodos exteriores	$r_{cr_e} := r_{ca} + \frac{a}{2}$ $r_{cr_e} = 26.27$	(m)
Fuerza producida por curva rápida	$F_{cr} := M \cdot \frac{\left(\frac{V_{cr}}{3.6}\right)^2}{r_{cr}}$ $F_{cr} = 134044.367$	(N)

Numero total de nodos en los que se va a aplicar la carga
(estructura lateral interior y exterior a la curva por
consideracion de simetria) $n_{cr_i} := 18$

Carga aplicada por nodo interno a la curva $F_{cr_ni} := \frac{F_{cr}}{n_{cr_i}} \cdot \frac{r_{cr}}{r_{cr_i}}$

$$F_{cr_ni} = 7951.852 \text{ (N)}$$

Carga nodal inferior $f_{cr_n_1} := F_{cr_ni} \cdot \left(\frac{1714}{1884} \right)$

$$f_{cr_n_1} = 7234.328 \text{ (N)}$$

Carga nodal superior $f_{cr_n_2} := F_{cr_ni} \cdot \left(\frac{170}{1884} \right)$

$$f_{cr_n_2} = 717.524 \text{ (N)}$$

Carga aplicada por nodo externo a la curva $F_{cr_ne} := \frac{F_{cr}}{n_{cr_i}} \cdot \frac{r_{cr}}{r_{cr_e}}$

$$F_{cr_ne} = 5669.516 \text{ (N)}$$

Carga nodal inferior (exterior curva) $f_{cr_n_11} := F_{cr_ne} \cdot \left(\frac{1714}{1884} \right)$

$$f_{cr_n_11} = 5157.935 \text{ (N)}$$

Carga nodal superior (exterior curva) $f_{cr_n_22} := F_{cr_ne} \cdot \left(\frac{170}{1884} \right)$

$$f_{cr_n_22} = 511.581 \text{ (N)}$$

3.4.7.9 Aplicación de cargas.

Para el ingreso de las cargas que afectan el modelo, se generan casos de carga, que son agrupaciones de cargas similares cuyos efectos se desea estudiar en la

estructura. Un caso de carga por sí solo no causa ninguna respuesta en la estructura. Los casos de carga de ser aplicados en casos de análisis para producir resultados.

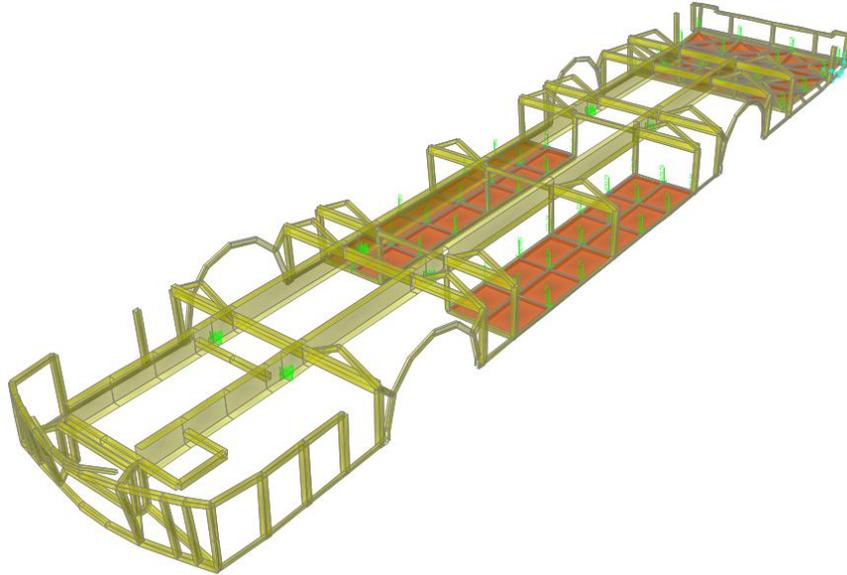


Fig. 3.50 Aplicación de cargas en caluelas laterales y posterior al modelo matemático de la unidad Feline de Miral.

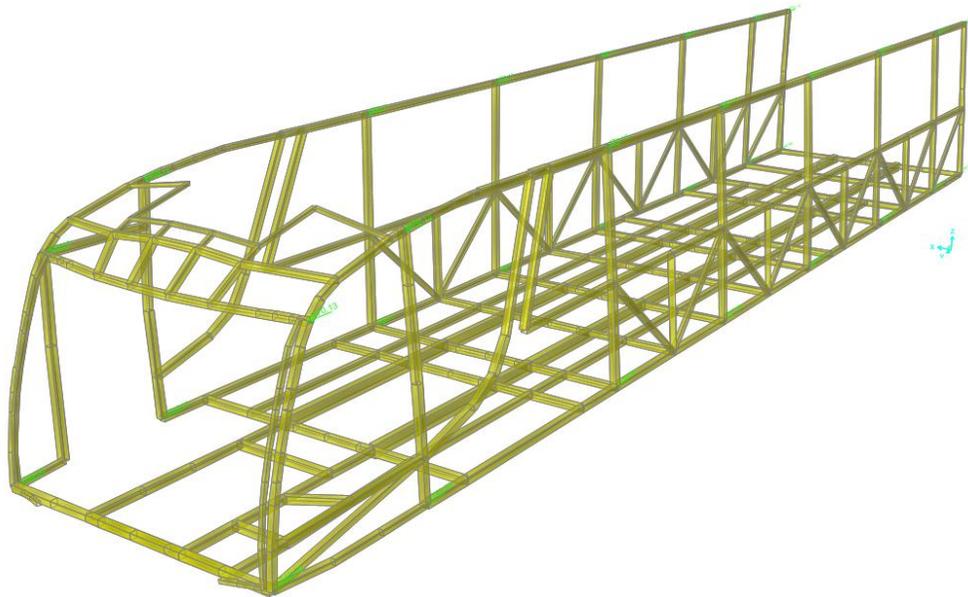


Fig. 3.51 Aplicación de cargas de frenado al modelo matemático de la unidad Feline de Miral.

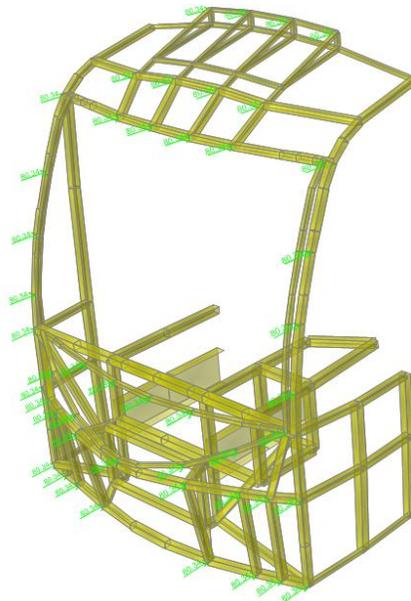


Fig. 3.52 Aplicación de cargas de viento al modelo matemático de la unidad Feline de Miral.

Las cargas dinámicas, como se observa la figura siguiente, tienen un tratamiento especial tanto en su ingreso, que se realiza mediante el comando *Define/Funtion/Time-History*, como en su análisis, tal y cómo se observará más adelante.

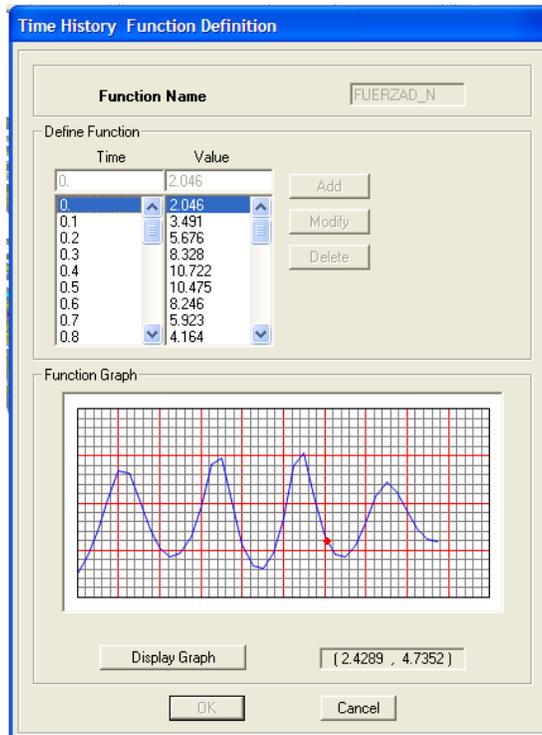


Fig. 3.53 Aplicación de cargas dinámicas (normalizadas) al modelo matemático de la unidad Feline de Miral.

3.4.8 SIMULACIÓN.

Una vez ingresadas todas las cargas en sus respectivos casos de carga, se establecen los casos de análisis, que gobiernan la forma en la cual las cargas son aplicadas a la estructura (estática o dinámicamente), cómo responde la estructura ante dichas cargas (linealmente o no-linealmente) y cómo se ejecuta el análisis (modalmente o integración directa).

SAP2000 asigna un caso de análisis para cada caso de carga ingresado. La mayoría de cargas aplicadas el presente proyecto son de carácter estático, es decir, su aplicación se realiza de manera paulatina hasta alcanzar el valor máximo y sus efectos se evalúan cuando esté se ha alcanzado. Pero, las cargas dinámicas no tienen este carácter, por lo tanto es necesario hacer una distinción en el caso de análisis que se encargue de la aplicación de las cargas dinámicas

definidas en el inciso correspondiente. A continuación se muestra los casos de análisis considerados por el presente proyecto, donde se observa que las cargas dinámicas tienen un tratamiento diferente de las estáticas y se aplican de una manera especial:

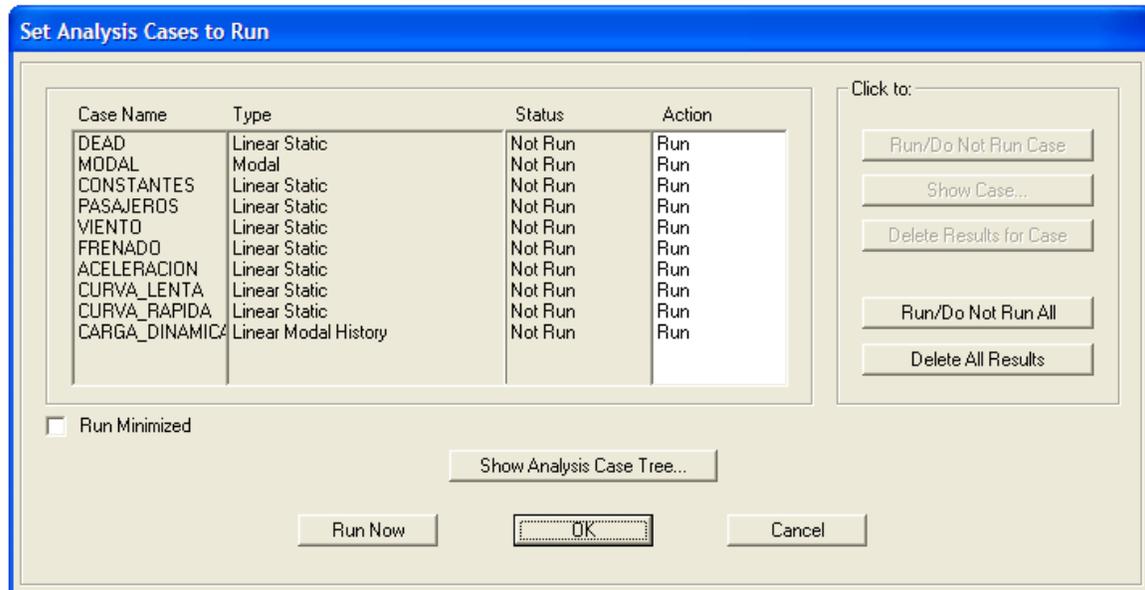


Fig. 3.54 Casos de análisis aplicados al modelo matemático de la unidad Feline.

En este caso, el tipo de caso de análisis para cargas dinámicas aplicadas en la estructura es conocido como Time History Linear Modal, porque tiene como entrada la función de cargas dinámicas (ver Fig. 3.53).

Del mismo, la respuesta de la estructura a la aplicación de las cargas en el presente proyecto se considera lineal, puesto que no se consideran variaciones de las propiedades del material en el transcurso de análisis y los esfuerzos y deformaciones obtenidos son directamente proporcionales a las cargas aplicadas.

Una vez estipuladas las condiciones mencionadas en los párrafos anteriores, se proceda la corrida de la simulación, donde el programa plantea las ecuaciones de equilibrio necesarias para resolver el sistema, crear las matrices de rigidez,

encuentra las deformaciones y esfuerzos en los nodos y realiza el análisis de vibraciones para obtener las respuestas del sistema a la aplicación de las cargas dinámicas.

CAPITULO 4

RESULTADOS

4.1 ZONAS CRÍTICAS

4.1.1 GENERALIDADES Y LINEAMIENTOS

La determinación de zonas críticas implica el estudio de los esfuerzos generados en cada zona y elemento de la estructura y la comparación de los mismos con esfuerzos admisibles para dichos elementos dictaminados por normativas de referencia.

Dado que se tiene diez situaciones de carga en las que se combinan los efectos de las diferentes cargas consideradas del modo el que se presentan la realidad y en casos extremos, es necesario determinar primeramente la situación de carga que demanda mayor sollicitación por parte de la estructura.

Una vez determinada tal situación extrema, será posible estudiar la distribución de esfuerzos que presente la misma y el margen de sollicitación al cual está sometida la estructura.

4.1.2 DETERMINACIÓN DE DENSIDAD DE CARGA EN LA ESTRUCTURA.

La densidad de carga de la estructura es un parámetro que permite evaluar el uso eficiente de los materiales en la construcción de la misma. Si es lo suficientemente baja, la capacidad de carga puede ser completamente empleada; pero por otra parte la eficiencia en el uso del material puede ser baja. La densidad de carga viene definida por la ecuación

$$K_e = \frac{W_e}{L_e}$$

4.1

Donde

K_e es la densidad de carga de la estructura carga (kg/m)

W_e representa la masa de la estructura (kg).

L_e es la longitud de la estructura (m).

Aplicando la relación a la unidad de transporte Feline de Miral se tiene:

Masa de la estructura $M_e := 2452.6$ (kg)

Longitud de la estructura $L_e := 13.1$ (m)

Densidad de carga $K_e := \frac{M_e}{L_e}$
 $K_e = 187.221$ $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}}\right)$

Se observa que el resultado está dentro del rango esperado, sin embargo es posible mediante una optimización del diseño conseguir una estructura más liviana.

4.1.3 DETERMINACIÓN DE SITUACIÓN CRÍTICA DE CARGA.

Para determinar el caso de carga más crítico al que se ve sometida la estructura en estudio del presente proyecto, se debe tener presente primeramente que el criterio de determinación y cálculo de las cargas actuantes sobre la misma es el de *cargas extremas*⁹⁷, es decir, las cargas aplicadas a la estructura tienen valores correctos y concebibles desde el punto de vista ingenieril y teórico, pero

⁹⁷ Véase Capítulo 3 inciso 3.3

en la práctica probablemente no se alcanzarán debido a limitaciones físicas del sistema⁹⁸.

Por lo tanto, las cargas de diseño y análisis están *implícitamente mayoradas*, siendo sus valores *superiores* a los que se presentan en la realidad y netamente aceptables desde punto de vista teórico. Esto significa que se está trabajando con cargas a las cuales implícitamente se les ha aplicado un factor de seguridad e incertidumbre.

El criterio de diseño estructural que se aplicará en el presente proyecto es el Diseño por Factor de Carga y Resistencia (LRFD por sus siglas en inglés)⁹⁹, por constituirse en una representación más real del comportamiento del acero estructural y por proveer considerables márgenes de seguridad bajo condiciones extremas de carga¹⁰⁰. LRFD utiliza factores para cada tipo de carga y otros factores para rigidez y resistencia. Diferentes factores reflejan grados de incertidumbre tanto en cargas como en resistencia por lo que una confiabilidad uniforme es alcanzable.

Dentro de este contexto, las cargas aplicadas a la estructura del presente proyecto se encuentran mayoradas con factores de carga dictaminados por criterios teóricos de ingeniería, por lo que concuerdan con el criterio LRFD.

Una vez elegido el criterio de análisis, y dada la complejidad y alto número de elementos que conforman la estructura de la unidad de transporte Feline de Miral, es necesario automatizar el proceso mediante SAP2000, haciendo uso del comando *Steel Design/Design Check*, el cual aplica el criterio de diseño estructural LRFD93 a cada miembro de la estructura en una corrida y presenta gráficamente los resultados de las zonas más esforzadas.

⁹⁸ Véase Capítulo 3 incisos 3.3.2.3; 3.3.2.4; 3.3.2.5; 3.3.2.6; 3.3.2.7.

⁹⁹ Load and Resistance Factor Design

¹⁰⁰ Ref. [20]

Dado que se aplicará el mismo criterio análisis para todas las situaciones de carga¹⁰¹, la situación de carga crítica será aquella que presente mayor cantidad de miembros sujetos a falla a través del criterio LRFD93, es decir zonas con mayores esfuerzos. Es necesario observar zonas críticas recurrentes en el proceso de chequeo de diseño.

¹⁰¹ Para definiciones de las situaciones de carga aplicadas véase Capítulo 3 inciso 3.3.3 en adelante.

4.1.3.1 Análisis Situación de Carga 1 (SC1).

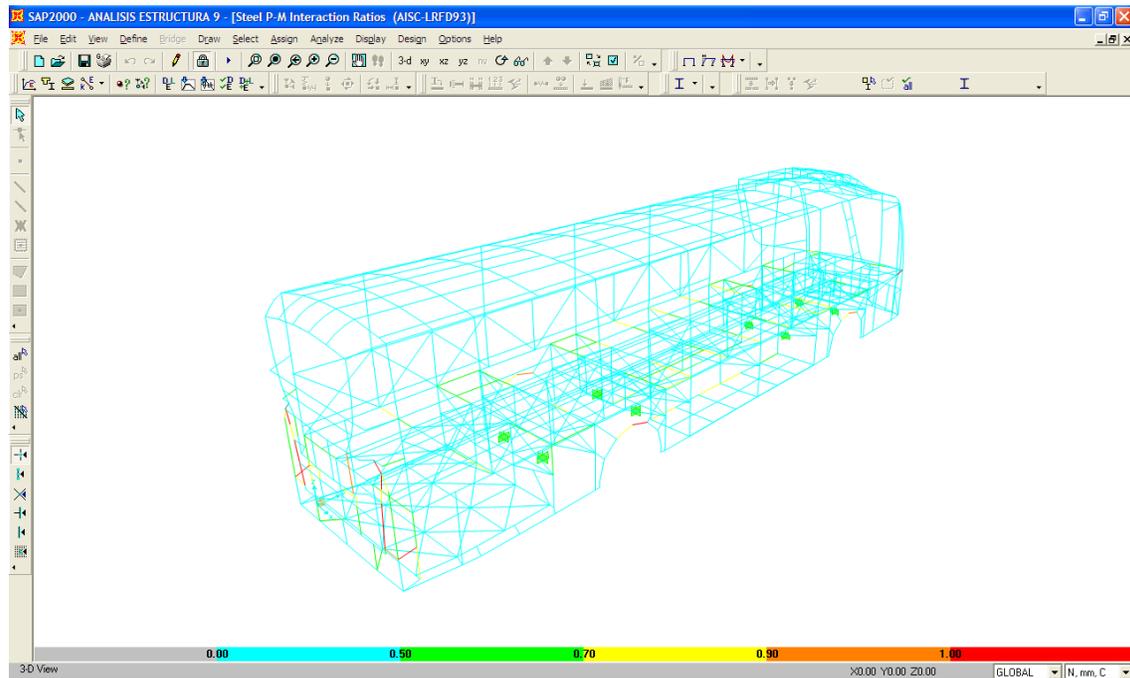


Fig. 4.1 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC1.

- El respaldo de la unidad presenta 4 elementos sometidos a esfuerzos que se acercan al límite de fluencia del material.
- Los laterales contienen la zona alrededor de los neumáticos donde empiezan a aparecer esfuerzos relativamente altos.
- El techo no presentan elementos comprometidos
- En el piso se observa que los largueros transversales tienen una distribución de esfuerzos alta, especialmente en determinadas zonas.
- En el frente y la zona de la cúpula no se observa la presencia de esfuerzos reactivos grandes de los elementos.
- Las zonas del piso que tienden a presentar esfuerzos de consideración es la zona alrededor de los ejes y la zona de los anclajes de la suspensión.

4.1.3.2 Análisis Situación de Carga 2 (SC2).

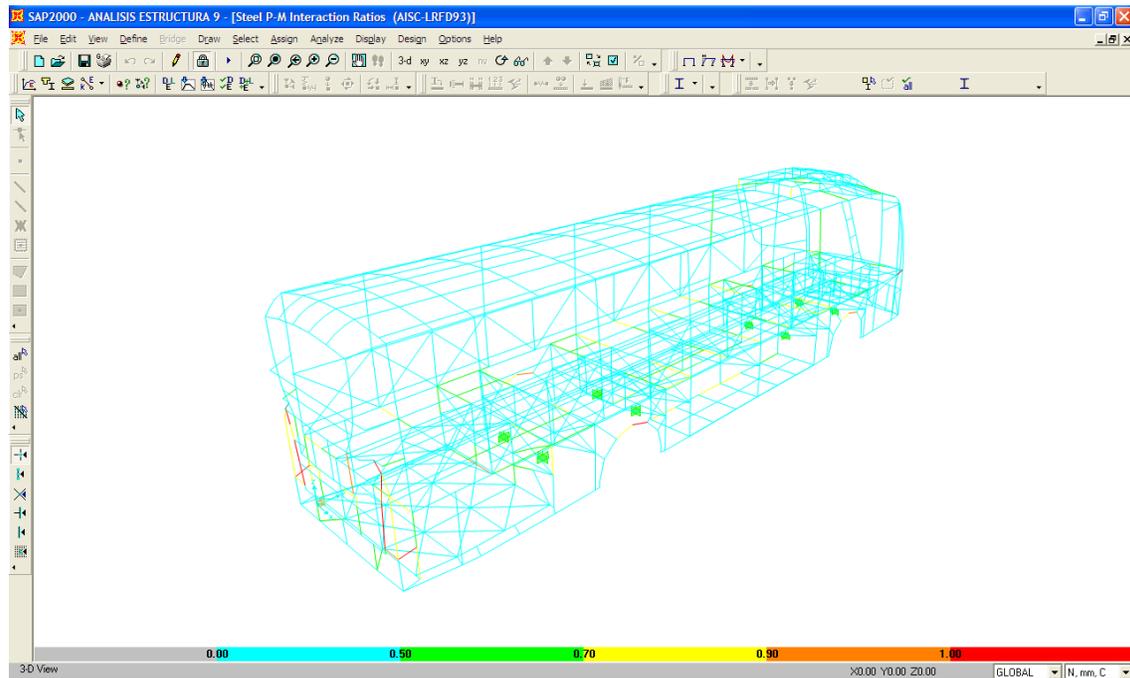


Fig. 4.2 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC2.

- El respaldo de la unidad presenta 4 elementos sometidos a esfuerzos que se acercan al límite de fluencia del material. La tendencia de los mismos a falla se mantiene.
- La zona alrededor de los neumáticos mantiene la tendencia de esfuerzos relativamente altos, del mismo modo alrededor de la puerta de acceso aparece un elemento esforzado.
- El techo, al igual que el caso anterior, no presenta elementos comprometidos
- En el piso se observa una tendencia de aumento de la distribución de esfuerzos en los largueros transversales con un número de elementos sometidos alto, especialmente en las zonas alrededor de los ejes y anclajes de la suspensión y en las uniones con las estructuras laterales.

- En el frente y la zona de la cúpula no se observa la presencia de esfuerzos reactivos grandes de los elementos.

4.1.3.3 Análisis Situación de Carga 3 (SC3).

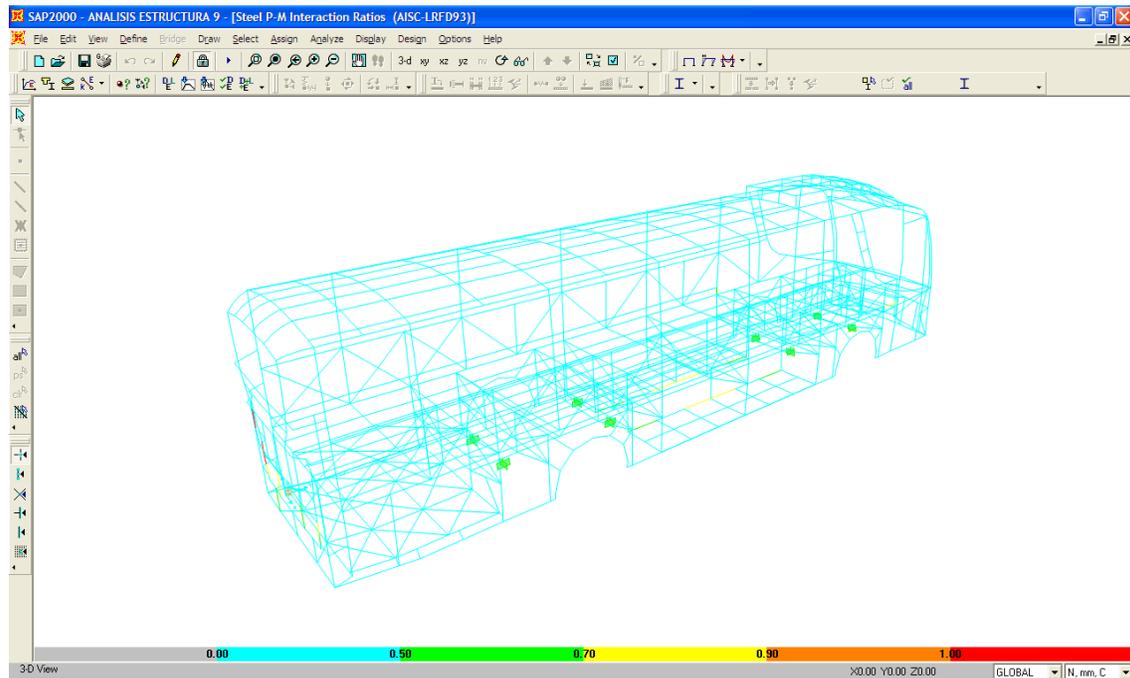


Fig. 4.3 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC3.

- El respaldo de la unidad presenta 2 elementos sometidos a esfuerzos que se acercan al límite de fluencia del material. La tendencia de los mismos a falla ha decrecido respecto al caso de carga anterior.
- La zona alrededor de los neumáticos no mantiene la tendencia de esfuerzos relativamente altos del caso anterior, no así la zona de la puerta de acceso donde se observa una pequeña incidencia de elementos esforzados (un elemento).
- El techo mantiene la tendencia de no presentar elementos comprometidos
- Las estructuras, tanto inferior como superior del piso, evidencian buena resistencia al caso de carga en análisis. Pero, la tendencia empieza a marcarse por la presencia de elementos medianamente esforzados en las zonas alrededor de los ejes de la unidad.

- En el frente y la zona de la cúpula no se observa la presencia de esfuerzos reactivos grandes en los elementos constitutivos.

4.1.3.4 Análisis Situación de Carga 4 (SC4).

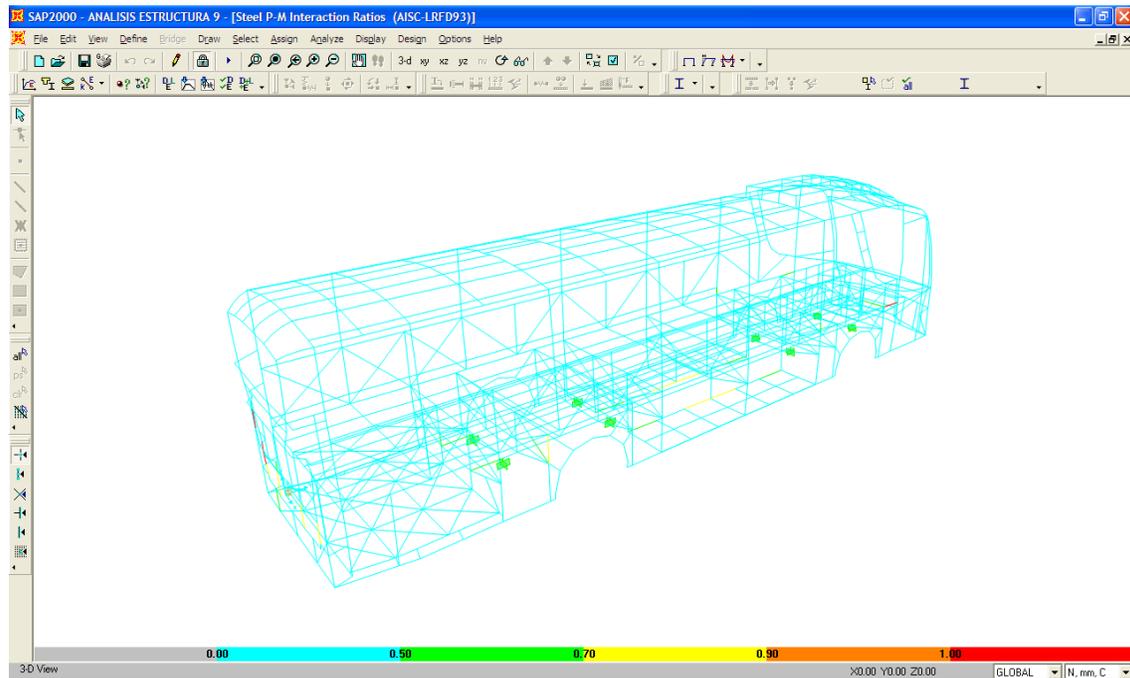


Fig. 4.4 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC4.

- El respaldo de la unidad presenta 3 elementos sometidos a esfuerzos que se acercan al límite de fluencia del material. La tendencia de los mismos a falla se mantiene respecto al caso de carga anterior.
- La zona alrededor de los neumáticos mantiene la tendencia de esfuerzos relativamente bajos del caso anterior. En la zona de la puerta de acceso donde se observa una pequeña incidencia de elementos esforzados (un elemento), al igual que en el caso anterior.
- El techo mantiene la tendencia de no presentar elementos comprometidos
- Las estructuras, tanto inferior como superior del piso, evidencian buena resistencia al caso de carga en análisis, al igual que la situación de carga anterior. Pero, del mismo modo, la tendencia empieza a marcarse por la presencia de elementos medianamente esforzados en las zonas alrededor de los ejes de la unidad.

- En el frente y la zona de la cúpula no se observa la presencia de esfuerzos reactivos grandes en los elementos constitutivos.

4.1.3.5 Análisis Situación de Carga 5 (SC5).

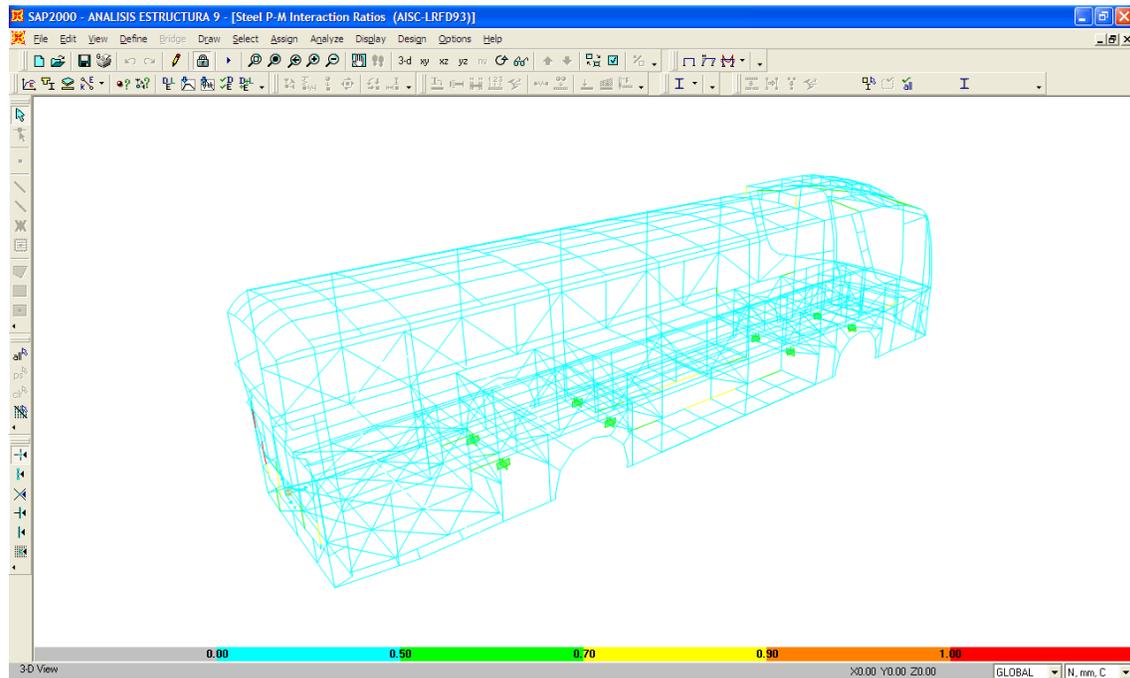


Fig. 4.5 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC5.

- El respaldo mantiene la tendencia de falla respecto a la situación de carga 3.
- La zona alrededor de los neumáticos mantiene también la tendencia de esfuerzos relativamente bajos del caso anterior, salvo la zona de la puerta al igual que la situación de carga anterior.
- El techo mantiene la tendencia de la situación anterior.
- Las estructuras, tanto inferior como superior del piso, evidencian buena resistencia al caso de carga en análisis, al igual que la situación de carga anterior. Pero, del mismo modo, la tendencia empieza a marcarse por la presencia de elementos medianamente esforzados en las zonas alrededor de los ejes de la unidad. En particular, la zona de transición entre la cajuela posterior y las estructuras del piso superior e inferior presenta esfuerzos de consideración (en especial en condiciones de carga dinámica).

- La zona de la cúpula presenta 4 elementos que tienden a acercarse a esfuerzos críticos. El frente de la unidad mantiene buena resistencia salvo la zona de los anclajes de motor.

4.1.3.6 Análisis Situación de Carga 6 (SC6).

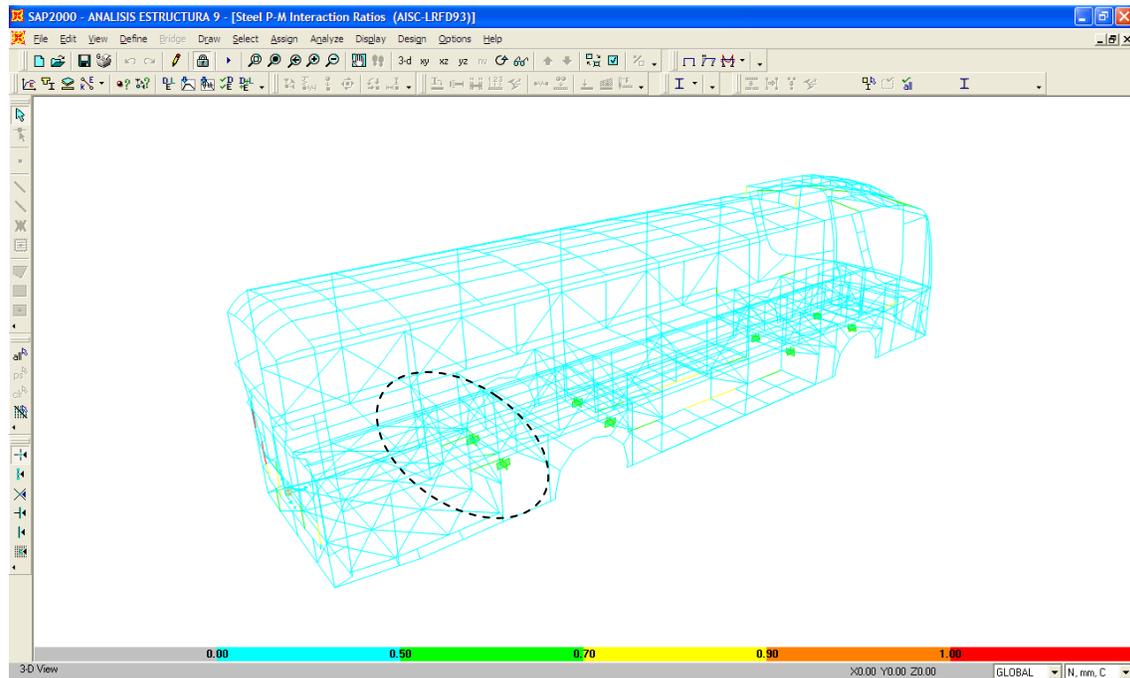


Fig. 4.6 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC6.

- El respaldo de la unidad presenta 8 elementos sometidos a esfuerzos que se acercan al límite de fluencia del material. La tendencia de los mismos a falla se mantiene.
- La zona alrededor de los neumáticos recupera la tendencia de esfuerzos relativamente altos, del mismo modo alrededor de la puerta de acceso reaparece un elemento esforzado.
- El techo no presenta elementos comprometidos
- En el piso se observa una tendencia de aumento de la distribución de esfuerzos en los largueros transversales con un número de elementos alto sometido a los mismos. La zona de transición entre cajuela posterior y piso mantiene la tendencia de esfuerzos altos, así como los soportes alrededor de los ejes y neumáticos.

- El frente y la zona de la cúpula presentan las mismas tendencias de falla que las de la situación anterior.

4.1.3.7 Análisis Situación de Carga 7 (SC7).

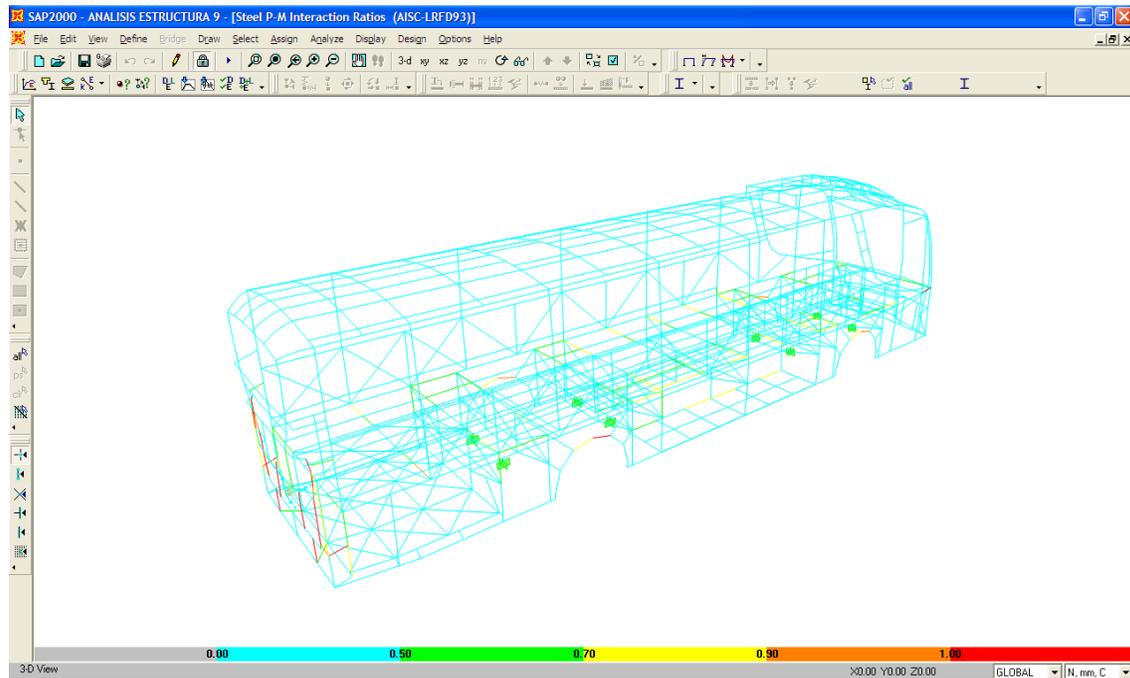


Fig. 4.7 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC7.

- El respaldo de la unidad presenta de igual manera 8 elementos sometidos a esfuerzos que se acercan al límite de fluencia del material. La tendencia de los mismos a falla se mantiene.
- La zona alrededor de los neumáticos mantiene la tendencia de esfuerzos relativamente altos, del mismo modo alrededor de la puerta de acceso se observa un elemento esforzado.
- El techo no presenta elementos comprometidos
- En el piso se mantiene la tendencia de aumento de presencia de alta distribución de esfuerzos en los largueros transversales, especialmente cerca de las uniones piso-lateral. La zona de transición entre cajuela posterior y piso mantiene la tendencia de esfuerzos altos, aunque inferiores valores de los mismos, así como los soportes alrededor de los ejes y neumáticos.

- En el frente y la zona de la cúpula no se observa la presencia de esfuerzos reactivos grandes en los elementos constitutivos.

4.1.3.8 Análisis Situación de Carga 8 (SC8).

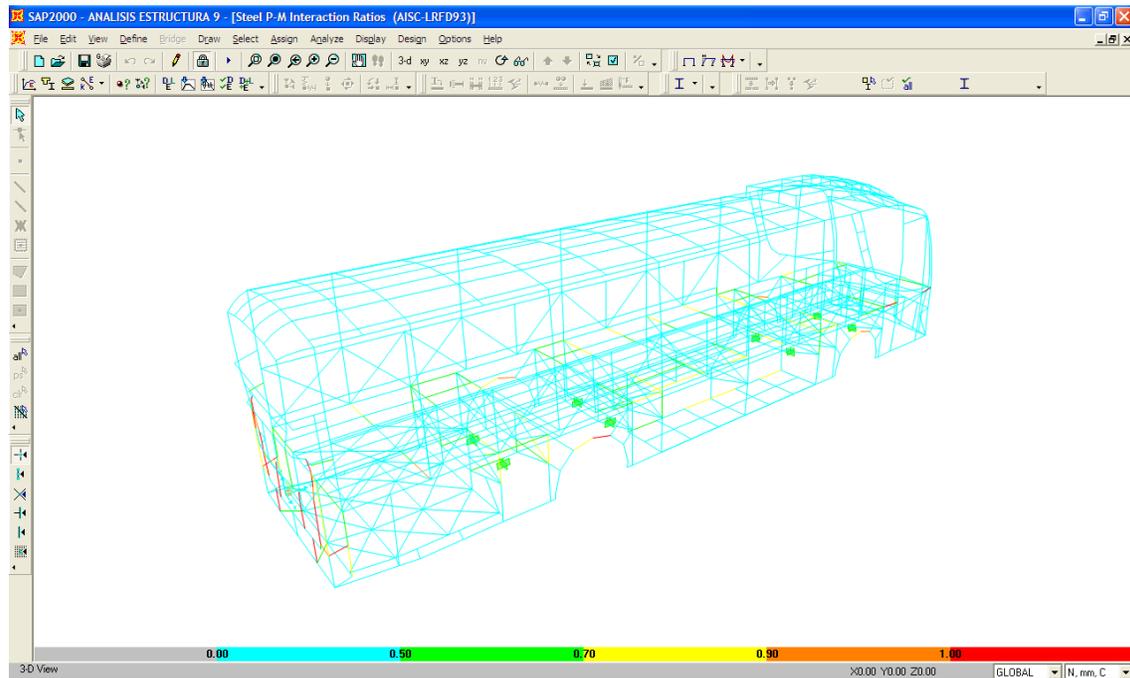


Fig. 4.8 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC8.

- El respaldo de la unidad presenta de 11 elementos sometidos a esfuerzos que se acercan al límite de fluencia del material. La tendencia de los mismos a falla se mantiene.
- La zona alrededor de los neumáticos mantiene la tendencia de esfuerzos relativamente altos, del mismo modo alrededor de la puerta de acceso se observa un elemento esforzado. La columna de soporte la ventana decorativa delantera presenta esfuerzos altos en ambos lados de estructura.
- El techo no presenta elementos comprometidos
- En el piso se mantiene la tendencia de aumento de presencia de alta distribución de esfuerzos en los largueros transversales, especialmente cerca de las uniones piso-lateral. La zona de transición entre cajuela posterior y piso mantiene la tendencia de esfuerzos altos, así como los soportes alrededor de los ejes y neumáticos.

- En el frente y la zona de la cúpula no se observa la presencia de esfuerzos reactivos grandes en los elementos constitutivos.

4.1.3.9 Análisis Situación de Carga 9 (SC9).

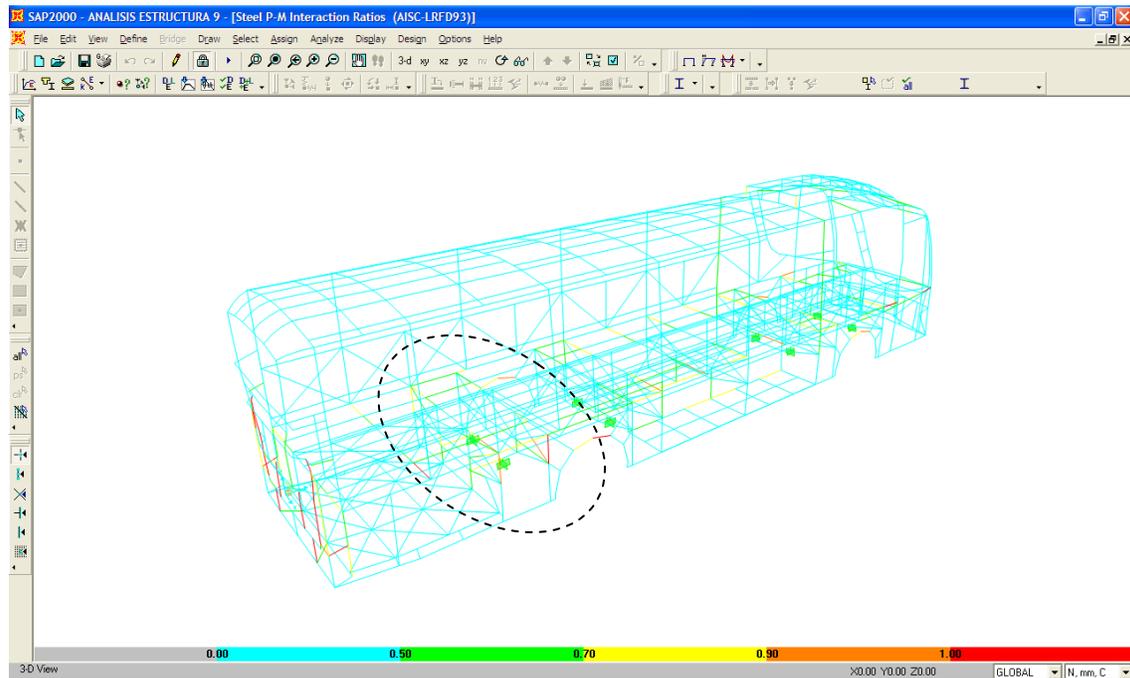


Fig. 4.9 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC9.

- El respaldo de la unidad presenta de 13 elementos sometidos a esfuerzos que se acercan al límite de fluencia del material. La tendencia de los mismos a falla se mantiene.
- Las zonas alrededor de los neumáticos mantienen la tendencia de esfuerzos relativamente altos, así como aparecen elementos en esta zona que absorben los esfuerzos altos producidos en la misma presentan alta distribución de cargas. Del mismo modo alrededor de la puerta de acceso se observa dos elementos esforzados. La columna de soporte la ventana decorativa delantera presenta esfuerzos altos en ambos lados de estructura.
- El techo no presenta elementos comprometidos
- En el piso se mantiene la tendencia de distribución de esfuerzos alta en los largueros transversales. La zona de transición entre cajuela posterior y

piso mantiene la tendencia de esfuerzos altos y en general, los soportes del voladizo posterior y zonas alrededor de los ejes.

- En el frente y la zona de la cúpula no se observa la presencia de esfuerzos reactivos grandes en los elementos constitutivos.

4.1.3.10 Análisis Situación de Carga a torsión 10 (SC10).

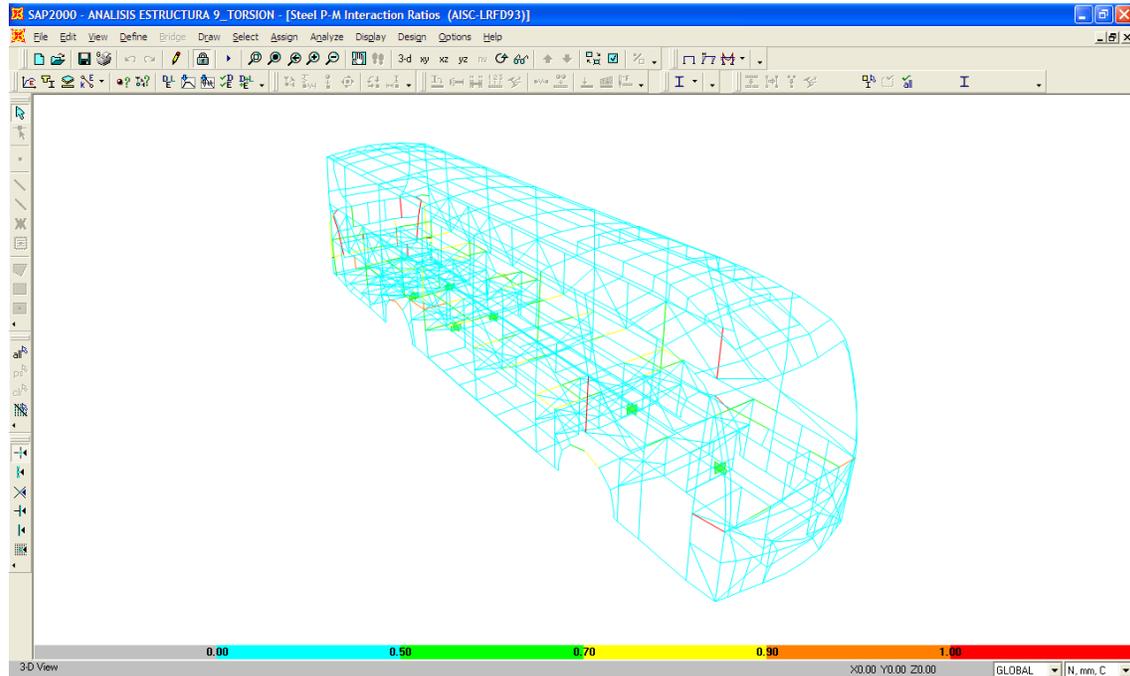


Fig. 4.10 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 bajo la acción de SC10.

- El respaldo de la unidad presenta de 9 elementos sometidos a esfuerzos que se acercan al límite de fluencia del material. La tendencia de los mismos a falla se mantiene respecto a las situaciones de carga a flexión.
- Las zonas alrededor de los neumáticos mantienen la tendencia de esfuerzos relativamente altos, en especial en la parte trasera de la estructura. Las tres primeras columnas de soporte ventana delanteras presentan una tendencia de aumento de esfuerzos debido a la falta de soporte en el lado derecho del estructura.
- El techo no presenta elementos comprometidos
- En el piso se mantiene la tendencia de distribución de esfuerzos alta en los largueros transversales, especialmente posteriores. La zona de transición entre cajuela posterior y piso mantiene la tendencia de esfuerzos altos, y general, los soportes del voladizo posterior y zonas

alrededor de los ejes, aunque los valores de los esfuerzos sean menores que los de la situación de carga anterior.

- En el frente y la zona de la cúpula no se observa la presencia de esfuerzos reactivos grandes en los elementos constitutivos.

4.1.3.11 Selección de situaciones de carga crítica.

Del análisis expuesto en las páginas anteriores se infiere que la situación de carga más crítica es la *SITUACIÓN DE CARGA 9 (SC9)* por encontrarse la mayor cantidad de elementos sujetos a falla en zonas críticas (recurrentes), de acuerdo los criterios de las normas de diseño estructural AISC-LRFD93. Cabe recalcar que, de aquí en más, los análisis realizados se referirán a dicha situación de carga.

4.1.3.12 Comportamiento general de la estructura ante la acción de la situación de carga crítica

A continuación se muestran los principales diagramas donde se resume el comportamiento de la estructura bajo la acción de la carga crítica. El primero de los diagramas a ser analizado es el de cargas axiales.

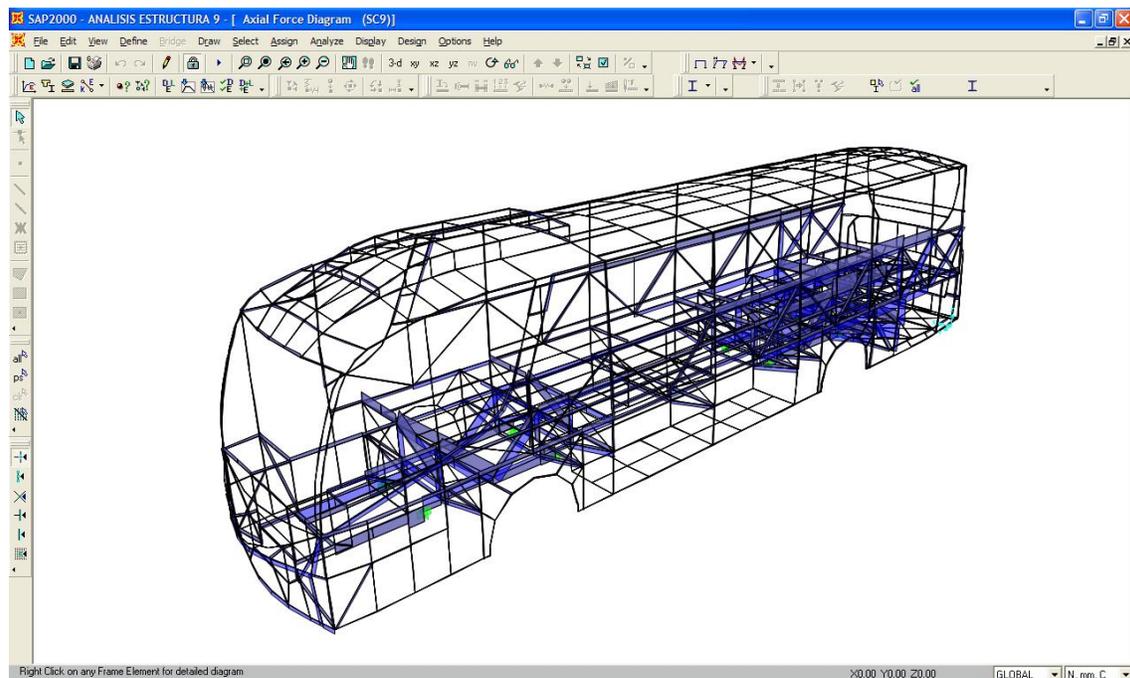


Fig. 4.11 Diagrama de fuerza axial en cada miembro de la estructura

Seguidamente se muestra una tabla con los elementos sometidos a mayor carga axial en la estructura. Es necesario notar que gran parte de elementos que poseen altas cargas axiales se encuentran en los alrededores del eje posterior de la unidad y cercanos a la cajuela trasera.

Tabla 4.1 Elementos que registran las mayores cargas axiales en la estructura de la unidad Feline.

ELEMENTO	CARGA AXIAL (N)	UBICACIÓN
35	36 052.86	Piso (eje trasero)
258	35 325.17	Anclaje de cajuela
36	-36 922.5	Piso (eje trasero)
27	-25 464.56	Piso (eje trasero)

La figura siguiente muestra los diagramas de torques que actúan en cada miembro de la estructura.

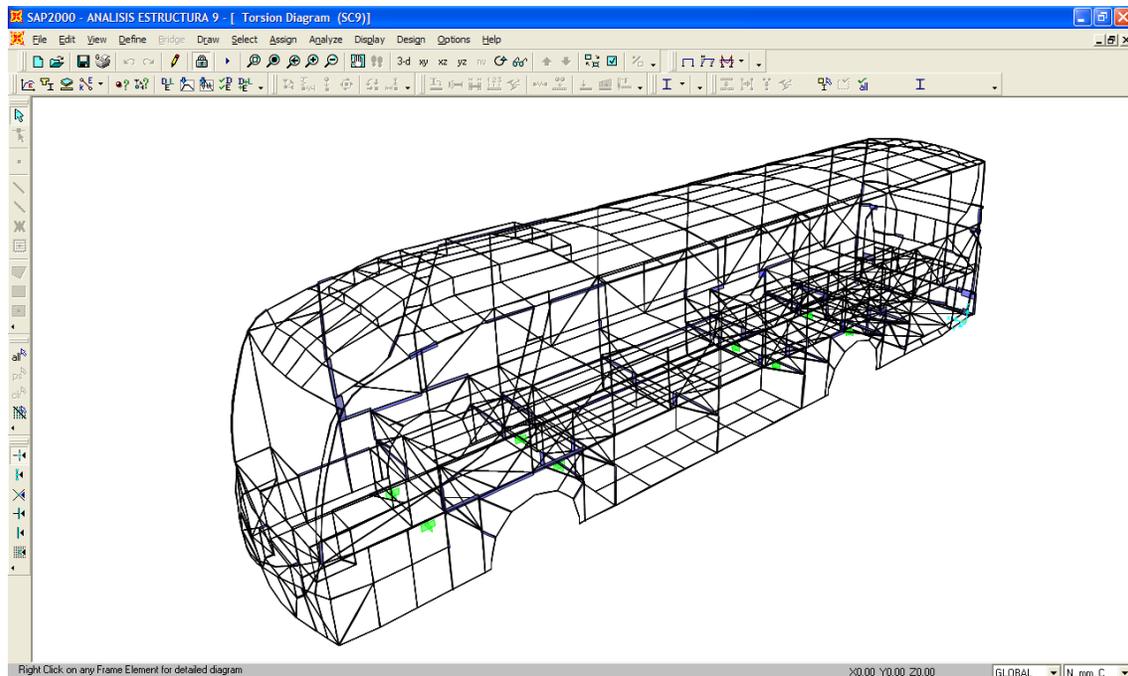


Fig. 4.12 Diagrama de torque de cada miembro de la estructura.

La tabla a continuación muestra los elementos sometidos a mayor torque en la estructura.

Tabla 4.2 Elementos que registran las mayores torques en la estructura de la unidad Feline.

ELEMENTO	TORQUE (mm-N)	UBICACIÓN
1414	-621 417	Respaldo
456	-593 994	Estructura lateral
1415	638 001	Respaldo
495	500 713	Estructura lateral

La fig. 4.13 muestra los diagramas de momento flector alrededor del eje local Y de cada elemento

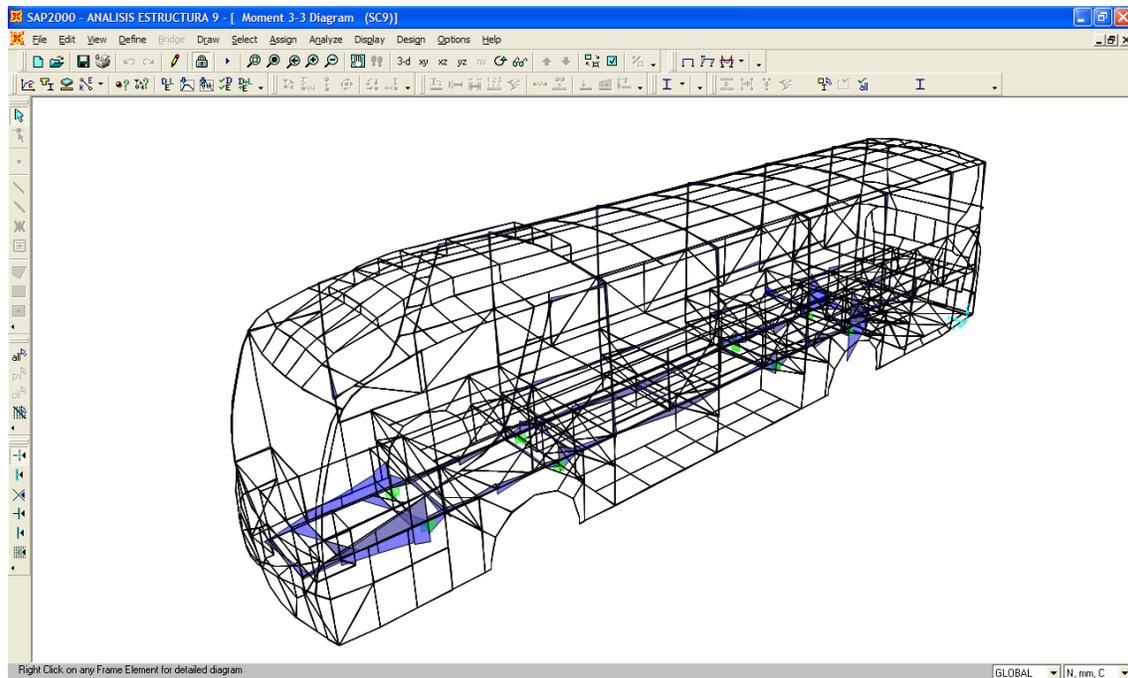


Fig. 4.13 Diagrama de momento flector (eje Y local de cada elemento) de cada miembro de la estructura.

Tabla 4.3 Elementos que registran los mayores momentos flectores en la estructura de la unidad Feline.

ELEMENTO	TORQUE	UBICACIÓN
----------	--------	-----------

	(mm-N)	
1522	4,737,453	Estructura lateral
1525	4,040,836	Estructura lateral
1533	3,394,785	Estructura lateral
1530	3,195,229	Estructura lateral

A continuación se muestra el diagrama de la estructura deformada bajo la acción de la carga crítica y se analiza datos de los nodos que sufren los mayores desplazamientos verticales y transversales bajo la acción de la carga crítica.

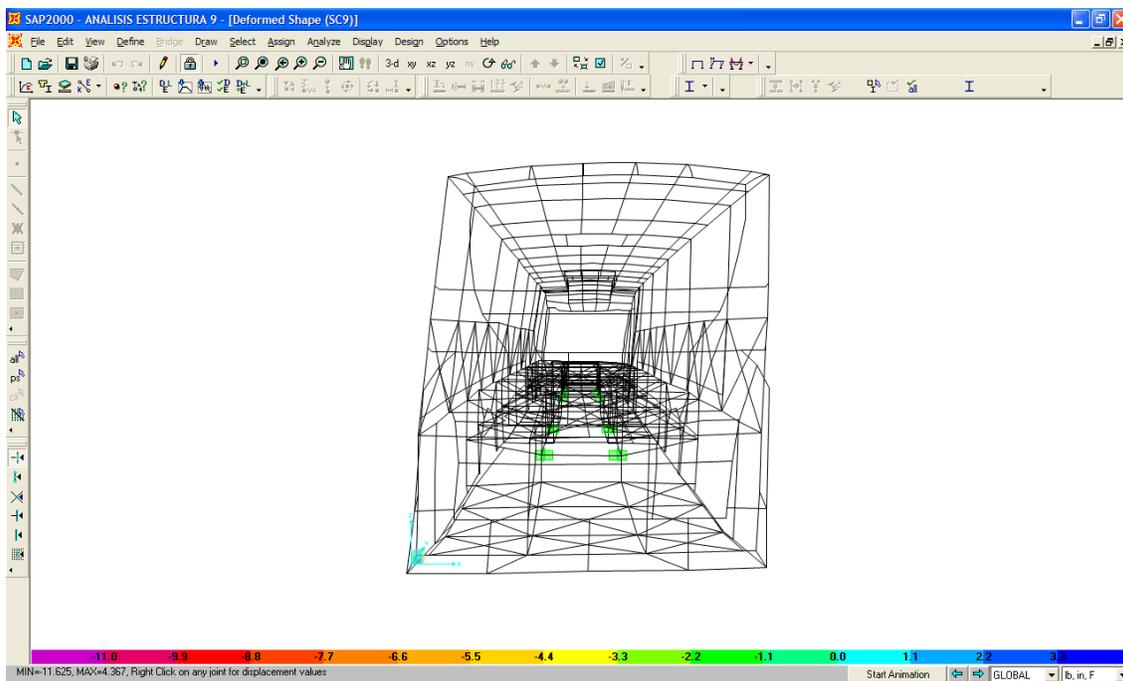


Fig. 4.14 Estructura deformada bajo la acción de carga crítica.

Tabla 4.4 Nodos donde se registran los mayores desplazamientos verticales

NODO	DESPLAZAMIENTO VERTICAL (mm)	UBICACIÓN
1094	-9.835939	Cúpula
36	-9.84805	Techo
1103	-10.169755	Cúpula
1093	-10.276951	Cúpula

Tabla 4.5 Nodos donde se registran los mayores desplazamientos resultantes.

NODO	DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL (mm)	DESPLAZAMIENTO VERTICAL (mm)	DESPLAZAMIENTO RESULTANTE (mm)	UBICACIÓN
1080	24.021783	0	25.245305	Cúpula
1121	24.018457	0.009601	25.24797	Cúpula
1081	24.01724	0	25.24835	Cúpula
1115	24.103612	0.073736	25.289332	Cúpula

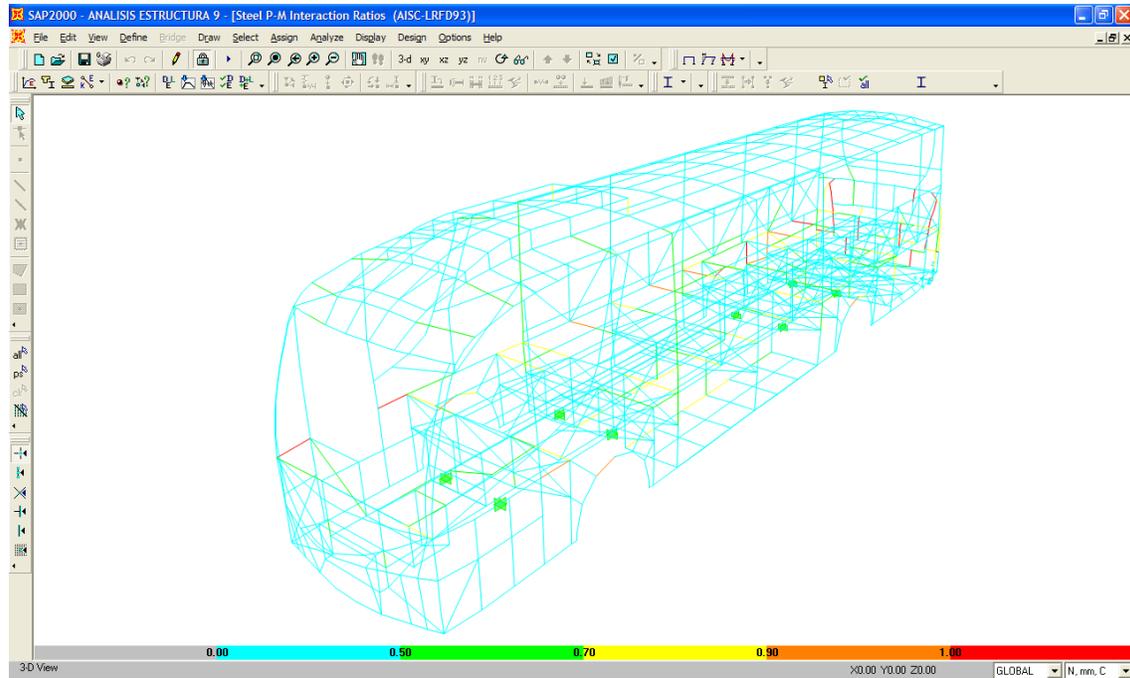


Fig. 4.15 Aplicación del criterio de diseño LRFD93 (SC9).

4.1.3.12.1 Análisis del comportamiento general de la estructura ante la acción de la situación de carga crítica

Es importante observar que los elementos situados sobre los ejes de la unidad presentan mayores fuerzas axiales, como resultado de la acción de la carga crítica. Este hecho concuerda con el diagrama distribución de esfuerzos mostrado la figura anterior, donde se observa de nuevo que las zonas alrededor de los ejes presentan los elementos con mayores esfuerzos.

Del mismo modo, el diagrama de momentos flectores alrededor del eje Y (local de cada elemento) muestra en la zona delantera, cerca del frente de la unidad, elementos sometidos a momentos flectores considerables, así como cerca del eje posterior.

Las deformaciones verticales llegan a los 10 (mm) bajo la acción de las cargas críticas de funcionamiento, resultado que implica que la estructura se encuentra dentro de los parámetros de aceptabilidad. Las mayores deformaciones totales se registran en la cúpula como consecuencia de los efectos de cargas de giro rápido y también se enmarcan dentro de parámetros aceptables.

4.1.3.13 Análisis de carga sobre los ejes

Es importante analizar la carga que soportan los ejes de la unidad debido a que el fabricante del chasis establece límites de carga para cada eje¹⁰². Superar los mismos significaría disminuir las capacidades de la unidad en maniobrabilidad, estabilidad y desempeño¹⁰³, además de rendimiento mecánico como es consumo de combustible, desgaste de neumáticos, suspensión, etc. A continuación se muestra la tabla que resume las condiciones de carga de los ejes de la unidad en vacío y con viajeros.

Tabla 4.6 Carga aplicada sobre los ejes del chasis de la unidad Feline.

CONDICIÓN DE CARGA DE LA UNIDAD	CARGA EN EL EJE POSTERIOR (kg)	CARGA EN EL EJE DELANTERO (kg)
Peso de la estructura (DEAD)	1364	1078
Carga muerta (constantes+DEAD) + Pasajeros	7906	6845

¹⁰² Véase Capítulo 3, Tabla 3.3

¹⁰³ Véase Capítulo 2, Tabla 2.5

Con la aplicación de las cargas muertas completas, el eje trasero presenta capacidad remanente, no así el delantero, donde se observa que existe sobrecarga por la presencia del motor y otros elementos necesarios para el funcionamiento.

4.1.4 ESPECIFICACIÓN DE ZONAS CRÍTICAS.

Siendo la situación de carga 9 (SC9) la más crítica que debe soportar la estructura, el análisis tanto de los diagramas de fuerza axial, momento torsor así como distribución de esfuerzos ha permitido tomar en consideración las siguientes zonas como críticas en la estructura:

1. Zona de transición entre cajuela posterior y piso.
2. Zonas de anclajes y estabilizadores cercanos a los ejes.
3. Zonas de estructuras laterales cercanas a las aberturas para los neumáticos y puerta de ingreso.
4. Zona inferior de la estructura del respaldo.

4.1.5 ANÁLISIS DE ZONAS CRÍTICAS.

4.1.5.1 Zona de transición entre cajuela posterior y piso.

A continuación se muestra en forma detallada la geometría y distribución de esfuerzos de la zona de transición entre cajuela posterior y piso, incluidos sus anclajes al chasis.

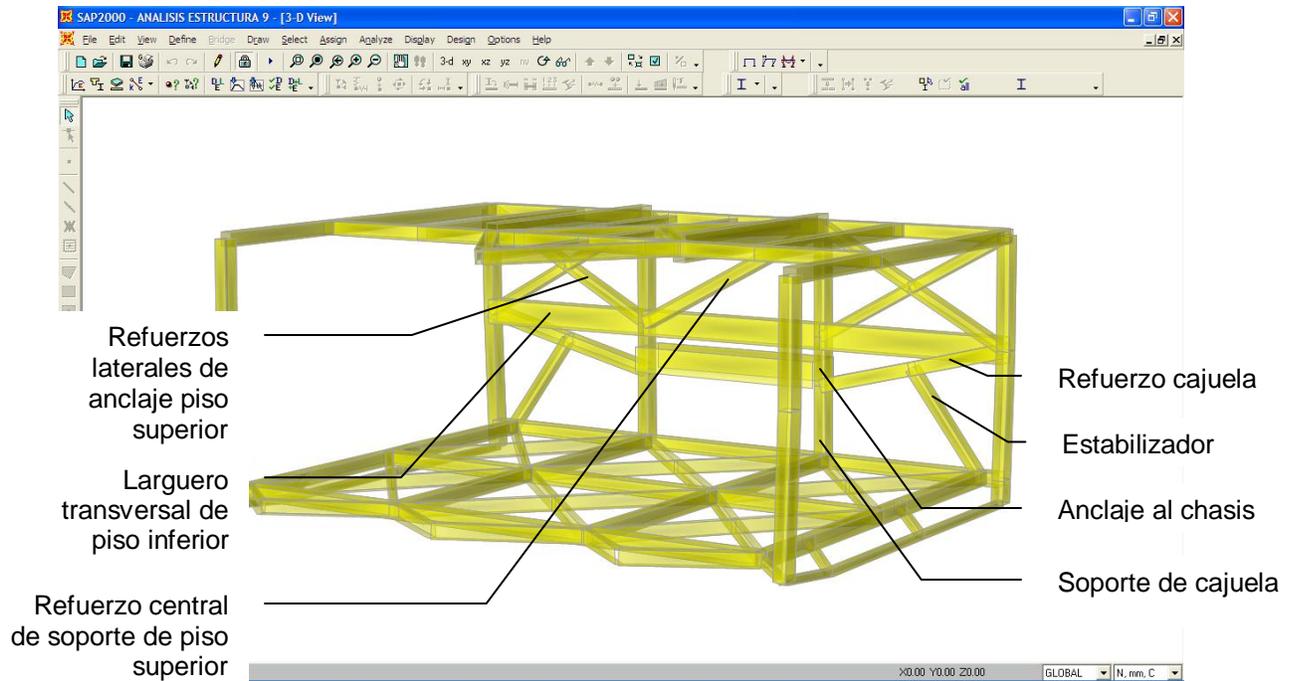


Fig. 4.16 Geometría de la Zona Crítica 1.

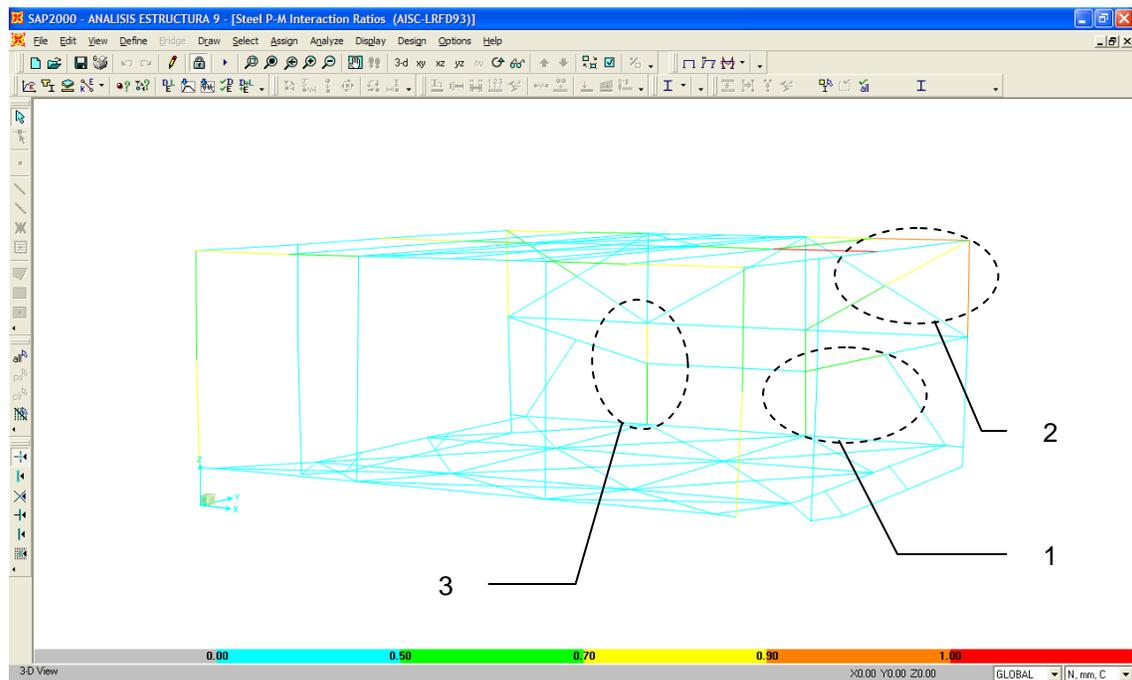


Fig. 4.17 Distribución de esfuerzos de la Zona Crítica 1.

La zona marcada como 1 en la figura anterior presenta 3 elementos que se encuentran al 50% de su capacidad. En la zona 2, un elemento (228) presenta

una utilización del 92% de su capacidad. La zona 3 presenta dos elementos con utilizaciones del 50 y 70% de su capacidad estructural según LRFD93, respectivamente.

Por lo tanto, los elementos más esforzados en la zona crítica 1 son los anclajes al chasis y los soportes verticales de la cajuela, que sufren grandes sollicitaciones en especial por la presencia de cargas dinámicas.

4.1.5.1.1 Análisis detallado.

Dada la importancia de la presente zona en análisis para la seguridad y funcionamiento estructural de la unidad de transporte, se procede al análisis detallado de la misma, tomando en consideración las cargas actuantes en los elementos que la conforman correspondientes del análisis en SAP2000 de la situación de carga 9.

Es importante recordar que dado que la SC9 considera cargas dinámicas de irregularidades de la vía, las cargas consideradas del presente análisis son de carácter extremo.

4.1.5.1.2 Consideraciones de análisis.

Para realizar el análisis de la zona en estudio, se realizó un corte imaginario alrededor de las partes de interés y se aisló el mismo tomando en consideración las cargas axiales actuantes en cada elemento. Tanto por concepción teórica como porque sus valores no son considerables en comparación con los de fuerza axial, las fuerzas cortantes dadas por SAP2000 no fueron consideradas.

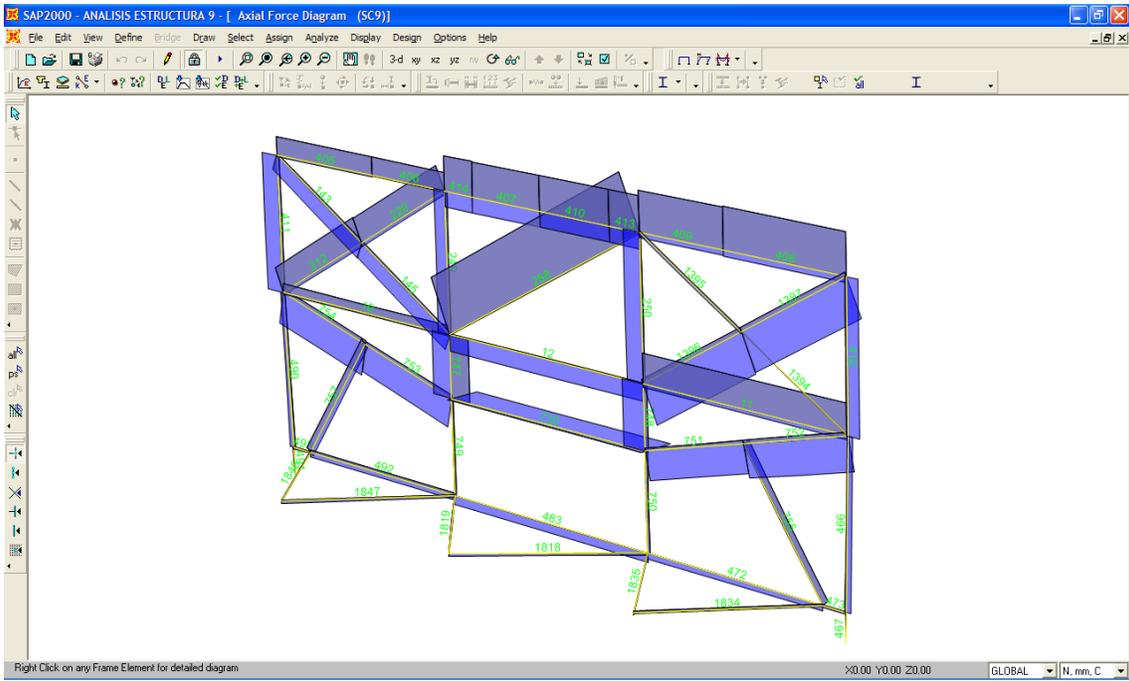


Fig. 4.18 Elementos considerados en el análisis de Zona Crítica 1.

Tabla 4.7 Fuerzas axiales en elementos considerados para análisis en Zona Crítica 1.

Elemento	Tipo de resultado	Fuerza axial P (N)
10	Máximo	5420.06
11	Máximo	17388.22
749	Máximo	1564.48
750	Máximo	1920.25
755	Máximo	4747.74
757	Máximo	4118.31
249	Máximo	1887.22
250	Máximo	1322.1
258	Máximo	35336.02
145	Máximo	1572.07
1396	Máximo	2620.27

4.1.5.1.3 Análisis en CosmosWorks 2006.

A continuación se muestran las figuras de modelado y distribución de esfuerzos generados por el software de elementos finitos CosmosWorks 2006.

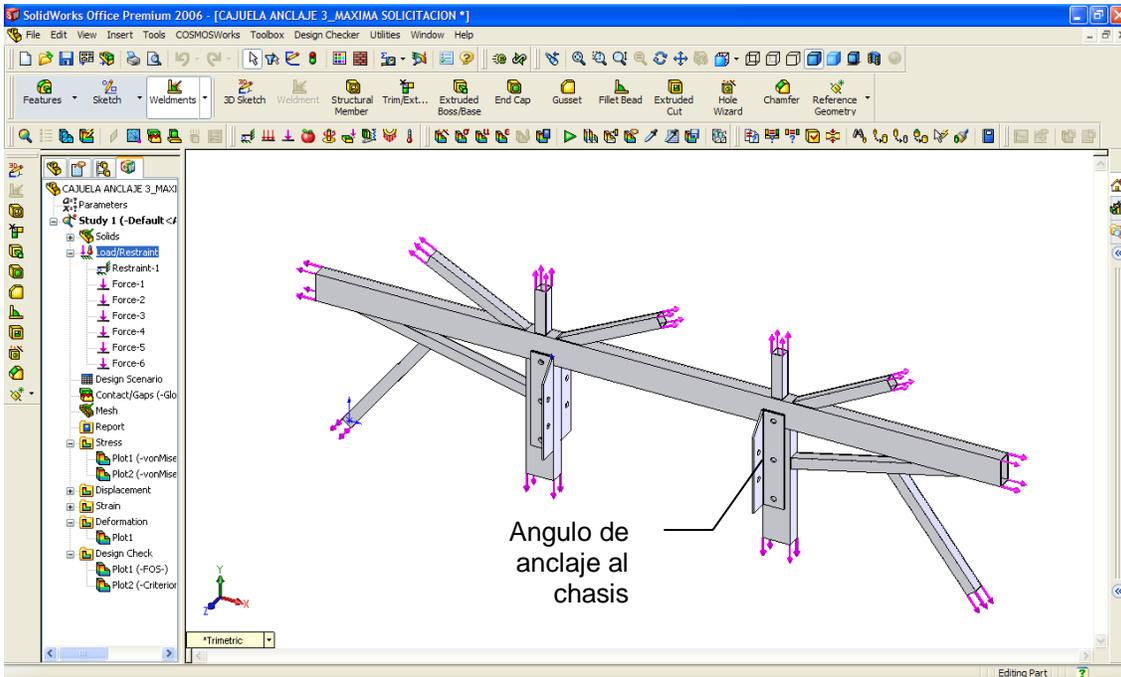


Fig. 4.19 Modelado y aplicación de cargas Zona Crítica 1.

Cabe destacar que el nivel de detalle del presente modelado aumenta debido a que se han incluido los ángulos de anclaje al bastidor del chasis.

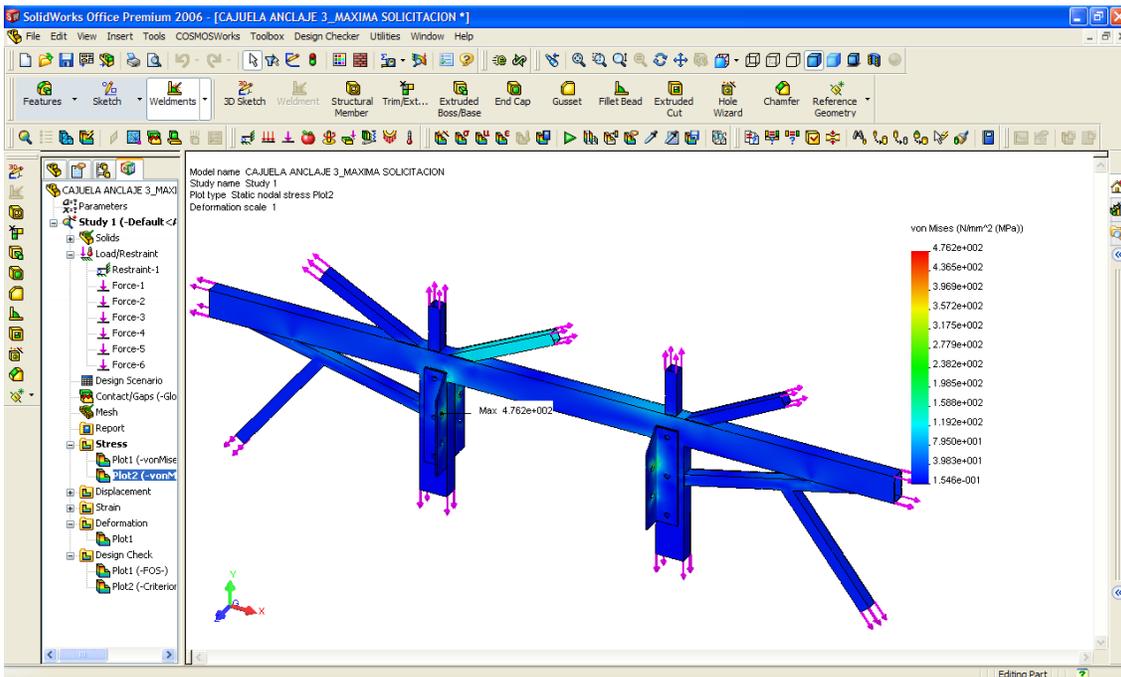


Fig. 4.20 Distribución de esfuerzos Zona Crítica 1.

La distribución de esfuerzos muestra que las zonas con mayor probabilidad a falla son, como era de esperarse, las zonas alrededor de los pernos de anclaje al chasis por ser zonas de concentración de esfuerzos. El valor máximo del esfuerzo de Von Mises en el ángulo anterior derecho alcanza los 470 (MPa) en un punto de la circunferencia del perno.

En general, la zona es capaz de soportar los esfuerzos de los cuales es sometida en la situación de carga extrema SC9 dada la distribución de esfuerzos calculada.

4.1.5.2 Zonas de anclajes y estabilizadores cercanos a los ejes.

A continuación se muestra la distribución de esfuerzos de la zona de anclajes y estabilizadores cercanos a los ejes

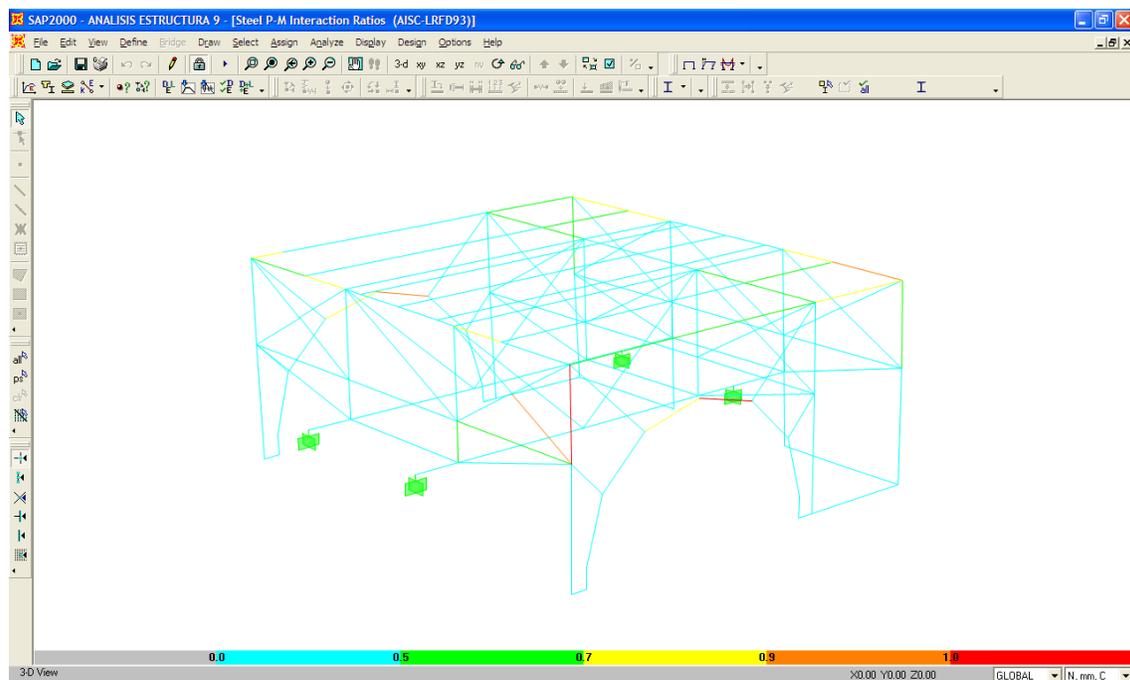


Fig. 4.21 Distribución de esfuerzos en zonas cercanas al eje posterior.

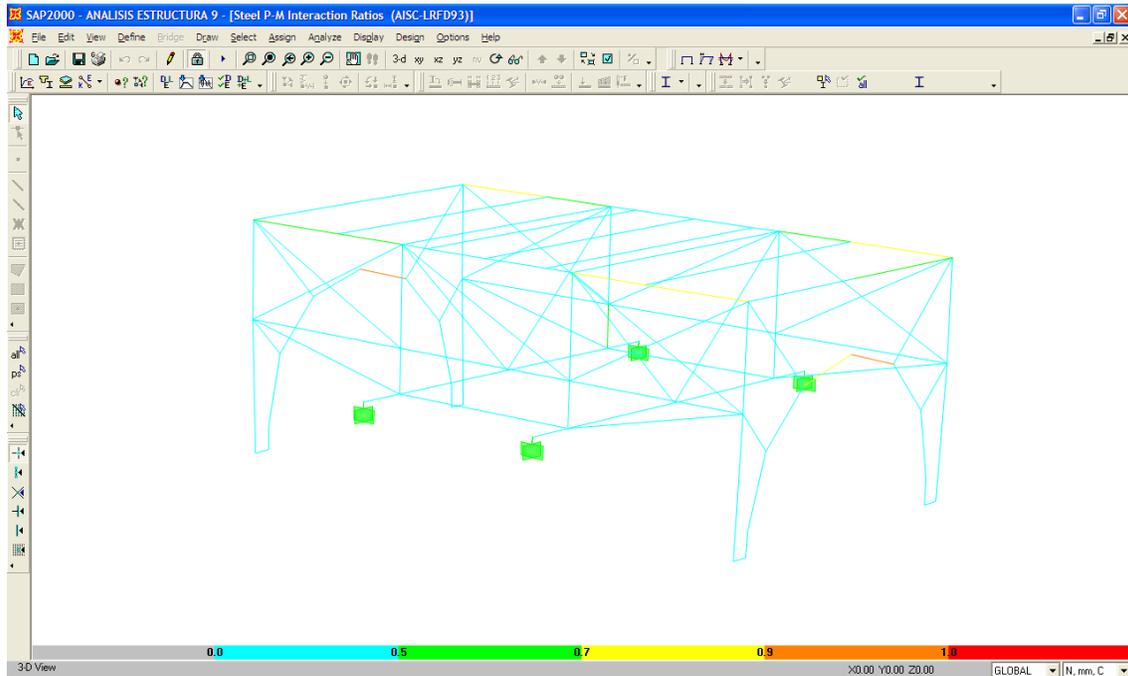


Fig. 4.22 Distribución de esfuerzos en zonas cercanas al eje posterior.

En las figuras mostradas se aprecia que los esfuerzos en los largueros transversales de piso inferior presentan valores de esfuerzos cercanos al 70%, de utilización de la capacidad de los miembros, debido a que las cargas dinámicas y de giro se transmiten hacia éstos por las uniones con los laterales, en especial en el eje posterior.

Dado que, en general, los elementos no fallan de acuerdo al criterio de diseño LRFD93, las zonas analizadas son capaces de soportar las cargas de simulación. Se observa también las zonas de la estructura alrededor de los neumáticos donde se concentran esfuerzos debido a los cambios de sección.

4.1.5.3 Zonas de estructuras laterales cercanas a las aberturas para los neumáticos y puerta de ingreso.

Las figuras siguientes muestran la distribución de esfuerzos que se presentan en las zonas de apertura para los neumáticos. En ciertos sectores de estas zonas se presentan esfuerzos relativamente altos, como es el caso de la zona del neumático posterior derecho, donde, de acuerdo a la aproximación realizada para el modelado, cerca de la zona central existe una sección donde los esfuerzos sobrepasan el ciento por ciento de porcentaje utilización.

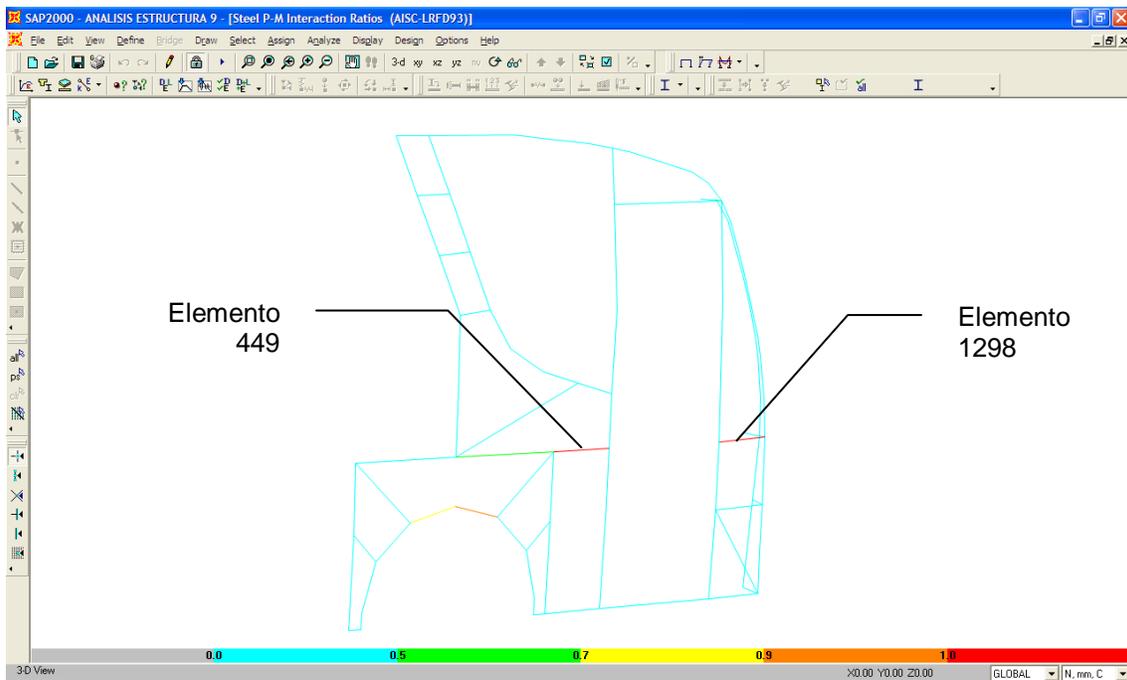


Fig. 4.23 Distribución de esfuerzos en zonas cercanas a la puerta de ingreso.

Es evidente el incremento de los esfuerzos en la zona de soporte de la ventana delantera y puerta, presentándose tendencia a falla por fluencia en ambos casos (elementos 449 y 1298).

4.1.5.4 Zona inferior de la estructura del respaldo

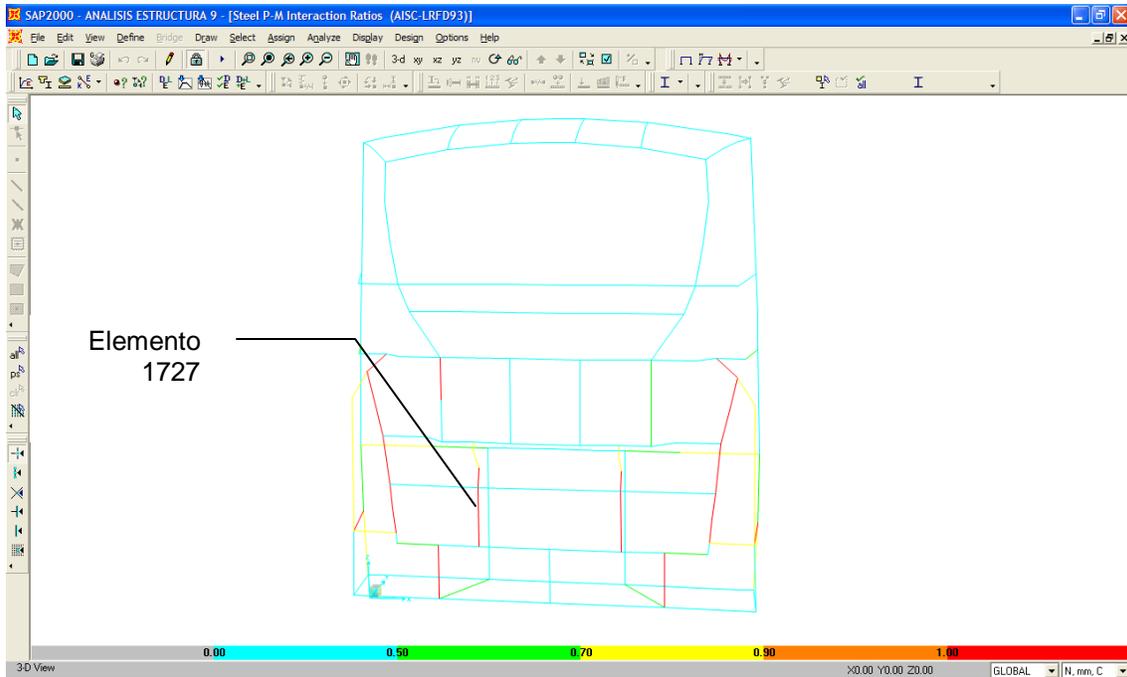


Fig. 4.24 Distribución de esfuerzos en zonas cercanas a la puerta de ingreso.

Miembros de soporte de los faros posteriores y cinco miembros verticales presentan esfuerzos relativamente altos desde el punto de vista del criterio de diseño. Se aprecia también que miembros conectores entre la estructura y los pórticos principales presentan esfuerzos tendientes a ser elevados.

4.2 MIEMBROS SOMETIDOS A ESFUERZOS EXCESIVOS.

4.2.1 MIEMBROS ESTRUCTURALES.

Atendiendo el análisis realizado en los párrafos anteriores, es importante estudiar ciertos elementos de las zonas consideradas críticas para observar su comportamiento individual y determinar con mayor objetividad si sus prestaciones están acorde a las necesidades.

Tabla 4.8 Elementos seleccionados para análisis.

NÚMERO	SECCIÓN	RELACIÓN DE UTILIZACIÓN
228	T50X50X2	1.210998
449	T50X50X2	1.474455
1298	T40X40X2	1.067409
1727	T25X25X2	1.791458
211	T50X50X3	0.557917
1414	T40X40X2	0.891315

4.2.1.1 Elemento 228

El elemento 228 constituye el soporte de la estructura para el alojamiento del neumático posterior derecho y está directamente afectado por los esfuerzos producidos por las cargas externas que actúan sobre el estructura durante su funcionamiento.

Dado que la zona donde se encuentra el elemento es una zona de transición (corte en la estructura, cambio de sección), las líneas de fuerza no se distribuyen de manera correcta desde la apertura del neumático hacia los anclajes de la estructura lateral con el piso, por lo que se produce la concentración de esfuerzos en el elemento y su consecuente sobre esfuerzo.

4.2.1.1.1 Ubicación

A continuación se muestra la ubicación del elemento y un resumen de las propiedades, cargas aplicadas y resultados de la aplicación del criterio de diseño LRFD93 al mismo.

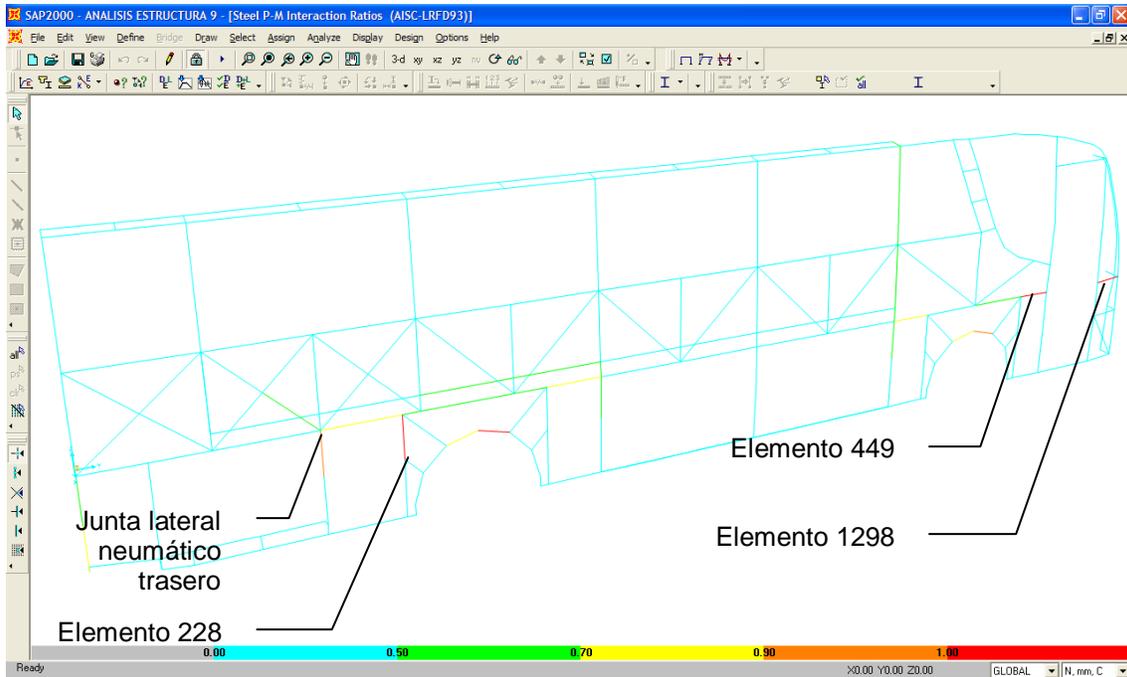


Fig. 4.25 Ubicación del elemento 228

4.2.1.1.2 Cargas y especificaciones.

Como paso inicial en el análisis del elemento se debe conocer las cargas que se aplican sobre el mismo. Para ello se recurre a SAP2000 *Display/Show Forces/Stresses*, donde, en el menú se seleccionan los diagramas requeridos. Para la presente aplicación se tomará carga axial y los momentos flectores en los ejes locales 22 y 33.

Tabla 4.9 Cargas aplicadas al elemento 228.

Carga axial P (N)	-1638.026
Fuerza cortante V2 (N)	-6570.083
Fuerza cortante V3 (N)	-1401.653
Torque (N.mm)	-181635.730
Momento flector M3 (N.mm)	-1926059.49
Momento flector M2 (N.mm)	-126211.891

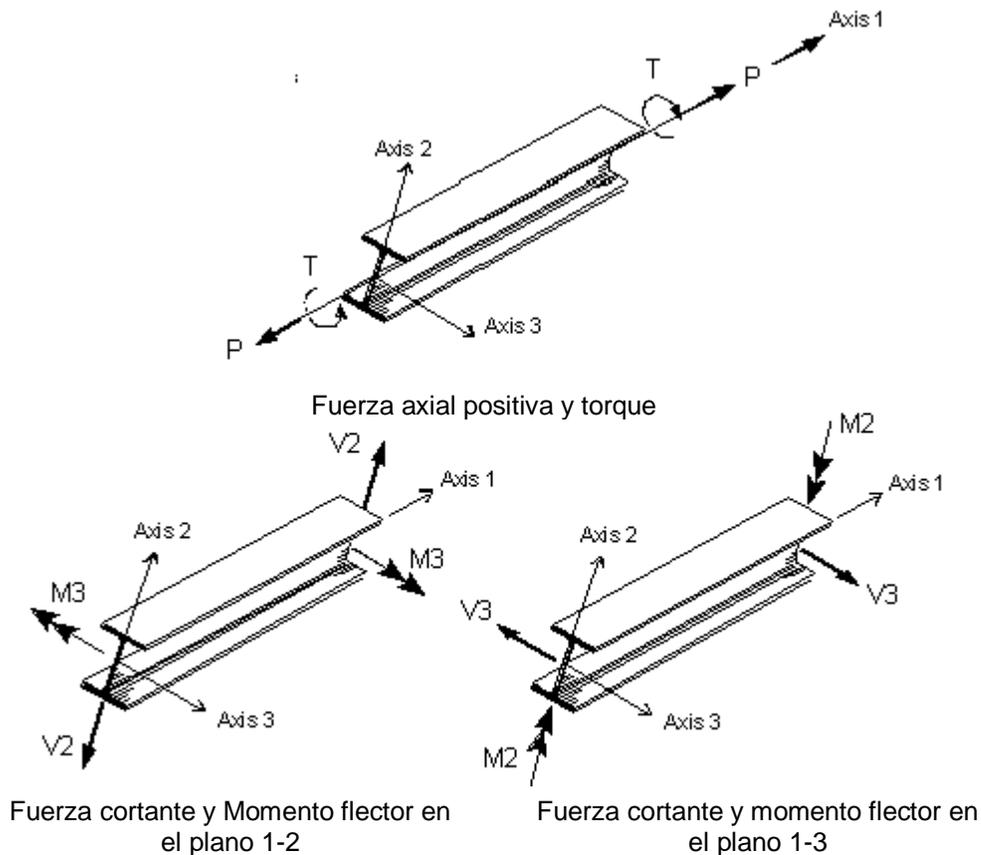


Fig. 4.26 Fuerzas internas actuantes en elementos FRAME en SAP2000

Una vez conocidas las cargas, y dado que la materia prima en la construcción de la unidad Feline son elementos tubulares de sección tanto cuadrada como rectangular¹⁰⁴, se aplica el criterio de Diseño por Factor de Carga y Resistencia para Secciones Estructurales Tubulares de Acero¹⁰⁵ preparado por el Instituto Americano de la Construcción de Acero AISC (por sus siglas en inglés¹⁰⁶).

Para iniciar el análisis se presentan a continuación los datos de la sección utilizados en los cálculos:

¹⁰⁴ Véase Capítulo 3, inciso 3.4.2.2

¹⁰⁵ Load and Resistance Factor Design Specification for Steel Hollow Structural Sections

¹⁰⁶ American Institute of Steel Construction

Dimensiones	Altura	$H_{50} := 50$	(mm)
	Ancho	$B_{50} := 50$	(mm)
	Espesor	$t := 2$	(mm)
Area total		$A_g := 384$	(mm^2)
Momento de inercia		$I := 147712$	(mm^4)
Radio de giro		$r := 19.613$	(mm)
Longitud		$l := 424.337$	(mm)
Modulo elastico de la seccion		$S_1 := 5908.48$	(mm^3)
Modulo plastico de la seccion		$Z := 6916$	(mm^3)

Es necesario también especificar los datos del material con el cual se está trabajando:

Módulo de elasticidad	$E := 199947.98$	(MPa)
Módulo de elasticidad por cortante	$G_{\text{acero}} := 76903$	(MPa)
Esfuerzo de fluencia	$F_y := 274.586$	(MPa)

El criterio de diseño HSS LRFD¹⁰⁷ considera factores de carga como factores de seguridad dependiendo del tipo de carga que se analice. Es decir, los valores de los factores de carga difieren para compresión y para flexión. Por lo tanto, según la norma, los factores de carga que se van a utilizar del presente análisis son los siguientes:

¹⁰⁷ Load and Resistance Factor Design for Steel Hollow Structural Sections, Ref.[21]

Factores de carga	$\phi_c := 0.85$	Compresión
	$\phi_b := 0.90$	Flexión
	$\phi_v := 0.90$	Cortante
	$\phi_T := 0.90$	Torsión

4.2.1.1.3 Análisis de resistencia a compresión.

Primeramente se verifica la resistencia del elemento a compresión aplicando los criterios HSS LRFD, para lo cual se debe calcular el factor de longitud efectiva, k , que depende de las conexiones del elemento con el resto de la estructura, es decir de los momentos de inercia de los miembros conectados y de sus áreas para calcular el valor G en cada conexión del elemento en análisis. Con este par de valores se puede leer de la gráfica¹⁰⁸ el valor de k .

Momentos de inercia y longitudes punto inicial

Vigas

$I_1 := 208492$	$I_2 := 73365.333$	$I_3 := 775178.667$	$I_4 := 73365.333$
$I_1 := 833.644$	$I_2 := 232.992$	$I_3 := 811.703$	$I_4 := 456.368$

Columnas

$I_5 := 147712$	$I_6 := 147712$
$I_5 := 424.337$	$I_6 := 569.021$

$$G_A := \frac{\frac{I_5}{l_5} + \frac{I_6}{l_6}}{\frac{I_1}{l_1} + \frac{I_2}{l_2} + \frac{I_3}{l_3} + \frac{I_4}{l_4}} \quad 4.2$$

$$G_A = 0.362$$

¹⁰⁸ Ref. [22], nomograma C-C2.1

Momentos de inercia y longitudes punto final

Vigas

$$I_{2_1} := 73365.333 \quad I_{2_2} := 147712 \quad I_{2_3} := 147712 \quad I_{2_4} := 147712$$

$$I_{2_1} := 533 \quad I_{2_2} := 474.668 \quad I_{2_3} := 700 \quad I_{2_4} := 170$$

Columnas

$$I_{2_6} := 147712$$

$$I_{2_6} := 569.021$$

$$G_B := \frac{\frac{I_{2_6}}{I_{2_6}}}{\frac{I_{2_1}}{I_{2_1}} + \frac{I_{2_2}}{I_{2_2}} + \frac{I_{2_3}}{I_{2_3}} + \frac{I_{2_4}}{I_{2_4}} + \frac{I_{2_5}}{I_{2_5}}} \quad 4.3$$

$$G_B = 0.154$$

Del nomograma C-C2.1 se tiene

$$\text{Factor de longitud efectiva} \quad k := 2.209$$

Con este valor encontrado se procede a definir el parámetro de esbeltez λ_c , que determina si el elemento falla de manera elástica, si su valor es mayor a 1.5, o plástica caso contrario:

$$\text{Parametro de esbeltez} \quad \lambda_c := \frac{k \cdot l}{\pi \cdot r} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad 4.4$$

$$\lambda_c = 0.564$$

El resultado anterior implica el elemento falla de la zona plástica, por lo tanto se emplea la ecuación siguiente para determinar la carga crítica

Carga crítica	$F_{cr} := 0.658^{\lambda_c^2} \cdot F_y$	4.5
	$F_{cr} = 240.384$ (MPa)	

La resistencia de diseño según HSS LRFD es

Resistencia de diseño	$\phi P_n := \phi_c \cdot A_g \cdot F_{cr}$	4.6
	$\phi P_n = 78461.454$ (N)	

Después de la comparación con la carga aplicada P_u (ver tabla 4.9), se deduce que el elemento resiste los efectos de las cargas externas a compresión.

4.2.1.1.4 Análisis de pandeo lateral.

Dado que la secciones en análisis son tubos de pared delgada, el necesario verificar la resistencia de los mismos al pandeo lateral, que por ser un fenómeno dependiente de la geometría del elemento puede presentarse en niveles más bajos de carga. En el pandeo lateral, las paredes de los elementos tienen a presentar deformaciones y aplastamientos bajo la acción de las cargas.

De acuerdo a las normas, el límite de esbeltez de los elementos analizados es $kl/r < 200^{109}$ para miembros a compresión y $kl/r < 300$ para elementos a tracción.

Para el presente elemento se tiene:

Limite de esbeltez (LRFD HSS SPEC. 2.3)	$\frac{k \cdot l}{r} = 47.793$	=> seccion compacta a traccion y compresion
--------------------------------------------	--------------------------------	------------------------------------------------

Se define a la tasa de esbeltez como parámetro de comparación para definir el fallo de la secciones por este fenómeno. Según la norma, para la sección en estudio se tiene:

¹⁰⁹ Ref. [21,22]

Tasa de esbeltez $\lambda := \frac{H_{50} - 3t}{t}$ 4.7

$\lambda = 22$

Es necesario definir también la resistencia a la fluencia axial de la sección que viene dada por¹¹⁰:

Resistencia a la fluencia axial $P_y := F_y \cdot A_g$ 4.8

$P_y = 105441.024$ (N)

Para la comprobación de pandeo se debe cumplir con la siguiente relación

Comparacion con resistencia a compresion $\frac{P_u}{\phi_b \cdot P_y} = 0.017 < 0.125$ 4.9

Dado que la relación es verdadera, se define la tasa de esbeltez plástica como parámetro de comparación con la del elemento:

Tasa de esbeltez para combinacion de flexion y compresion axial $\lambda_p := 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \cdot \left(1 - \frac{2.75 P_u}{\phi_b \cdot P_y} \right)$ 4.10

(Tomado de LRFD DESIGN SPECIFICATIONS FOR STEEL HOLLOW STRUCTURAL SECTIONS, $\lambda_p = 96.647$ Seccion 2.2, Tabla 2.2)

$\lambda < \lambda_p$ => SECCION COMPACTA
NO FALLA POR PANDEO LOCAL

El resultado anterior indica que la sección es compacta y dada su geometría, el pandeo local no se presenta.

La siguiente relación demuestra la tendencia del elemento al pandeo lateral torsional (LTB¹¹¹ por sus siglas en inglés), que se presenta en la flexión y torsión de los elementos, siendo su naturaleza la misma que la explicada anteriormente:

¹¹⁰ Ref. [21]

Limite de pandeo lateral torsional elástico

$$L_{p1} := 1.76r \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$L_{p1} = 931.485$$

$$l < L_{p1} \Rightarrow \text{NO FALLA POR PANDEO LATERAL ELASTICO}$$

Como aproximación y para adquirir una visión general, si se considera que todos los elementos se encuentran sometidos a compresión debida a flexión, la resistencia a pandeo lateral de los materiales utilizados en la construcción de la unidad Feline se resume en la siguiente tabla¹¹²:

Tabla 4.10 Tendencia a pandeo local de los elementos de la unidad Feline.

Elemento	λ	λ_p
T25X25X2	9.5	101.46
T40X40X2	17	
T50X50X2	22	
T50X50X3	13.7	
T100X50X2	47	
T100X50X3	30.3	

Es claro que para un análisis más detallado es necesario conocer las cargas axiales a las cual está sometido cada elemento, pero, el presente análisis pretende demostrar, de manera general, la baja tendencia al pandeo lateral que presentan las secciones tubulares cerradas.

4.2.1.1.5 Análisis de resistencia a flexión.

¹¹¹ Lateral Torsional Buckling LTB, Pandeo lateral torsional

¹¹² Ref. [21], Tabla 2.2-1, HSS rectangular sometido a compresión debida a flexión.

Conocidos los parámetros anteriores es posible determinar los momentos de diseño en función de los datos proporcionados anteriormente:

Momento elastico	$M_y := F_y \cdot S_1$	4.11
------------------	------------------------	------

	$M_y = 1622385.889$	(N·mm)
--	---------------------	--------

	$1.5M_y = 2433578.834$	(N·mm)
--	------------------------	--------

Momento plastico	$M_p := F_y \cdot Z$	4.12
------------------	----------------------	------

	$M_p = 1899036.776$	(N·mm)
--	---------------------	--------

Dado que $M_p < 1.5M_y$, AISC LRFD define el momento de diseño como

Momento de diseño	$\phi M_n := \phi_b \cdot M_p$	4.13
-------------------	--------------------------------	------

	$\phi M_n = 1709133.098$	(N·mm)
--	--------------------------	--------

De la comparación con la carga mayorada aplicada, se deduce que el elemento resiste los efectos de las cargas externas a flexión en el eje local 22 (y), no así en el 33 (x). Por lo tanto, la falla del elemento se inicia por su falta de resistencia al momento flector 33.

4.2.1.1.6 Análisis de resistencia a fuerzas cortantes

Dado que se presentan fuerzas cortantes en el elemento considerado es necesario verificar su resistencia a las mismas, para lo cual se puede utilizar la definición de área efectiva de corte¹¹³:

¹¹³ Ref. [23,25]. Para un estudio detallado de la deducción y significado del área efectiva de corte, refiérase al Anexo B

$$a_r = \frac{I^2}{\int_{y_b}^{y_t} \frac{Q^2(y)}{b(y)} dy} \quad 4.14$$

Para secciones tubulares rectangulares se define el área de resistencia a cortante o área efectiva de corte como¹¹⁴:

$$\begin{aligned} \text{Area de resistencia a cortante} \quad A_w &:= 2H_{50}t & 4.15 \\ A_w &= 200 \quad (\text{mm}) \end{aligned}$$

La carga crítica se limita por el parámetro h/t que se define como:

$$\begin{aligned} \text{Limitantes para carga critica} \quad h &:= H_{50} - 3t & 4.16 \\ h &= 44 \quad (\text{mm}) \\ \frac{h}{t} &= 22 & 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 66.113 \\ & & > h/t \end{aligned}$$

Dado que $22 < 66.113$, se define la resistencia crítica a cortante como:

$$\begin{aligned} \text{Resistencia critica a cortante} \quad F_n &:= 0.6F_y & 4.17 \\ F_n &= 164.752 \quad (\text{MPa}) \end{aligned}$$

y la resistencia de diseño según HSS LRFD es:

$$\begin{aligned} \text{Resistencia de diseno} \quad \phi V_n &:= \phi_v \cdot A_w \cdot F_n & 4.18 \\ \phi V_n &= 29655.288 \quad (\text{N}) \end{aligned}$$

Del análisis de la tabla 4.9, deduce que la resistencia de diseño es suficiente para soportar las fuerzas cortantes aplicadas.

¹¹⁴ Ref. [21]; Anexo B,

4.2.1.1.7 Análisis de resistencia a torsión.

La importancia del presente análisis radica en que la estructura analizada soporta cargas que generan el fenómeno de torsión en determinados elementos. Por lo tanto, no se debe pasar por alto la verificación de la resistencia de los mismos a la torsión.

Es necesario tomar el resultado del análisis de resistencia fuerzas cortantes ($22 < 66.113$) dado que se trata de la misma sección transversal. Partiendo del mismo, la carga crítica a torsión definida por HSS LRFD es:

$$\begin{aligned} \text{Carga crítica a torsión} & & F_{cr_{\text{torsion}}} & := 0.6F_y & & (h/t < 66.113) & & 4.19 \\ \text{(LRFD HSS Spec. 61-3)} & & & & & & & \\ & & F_{cr_{\text{torsion}}} & = 164.752 & & \text{(N)} & & \end{aligned}$$

En una sección tubular HSS, el esfuerzo cortante producido por torsión pura es asumido como uniformemente distribuido y equivale al torque aplicado T_u dividido para una constante torsional de la sección C . Para una sección rectangular HSS, C se obtiene usando la analogía de la membrana¹¹⁵, y representa la oposición de la sección a la acción del torque aplicado. Para la sección en análisis se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Constante torsional de corte} & & C_{\text{HSS}} & := (B_{50} - t) \cdot (H_{50} - t) \cdot t - 4.5(4 - \pi)t^3 & & 4.20 \\ \text{(LRFD HSS COMM. C6-3)} & & & & & \\ & & C_{\text{HSS}} & = 4577.097 & & \text{(mm}^3\text{)} & & \end{aligned}$$

Conocido valor de la constante torsional, es posible aplicar la definición de torque de diseño especificada por la HSS LRFD

¹¹⁵ Ref.[24]

Torque de diseño
(LRFD HSS Spec. 61-1)

$$\phi T_n := \phi_T \cdot F_{cr_{torsion}} \cdot C_{HSS} \quad 4.21$$

$$\phi T_n = 678675.698 \quad (\text{mm N})$$

De la Tabla 4.9 se deduce que el torque aplicado es soportado de manera satisfactoria por el elemento elemento.

A manera de comprobación de los criterios HSS LRFD, a continuación se analiza el elemento considerando los esfuerzos cortantes que el torque genera mismo. Para lo cual se define el área delimitada la línea media del espesor de la sección como:

Area delimitada por la linea media $A_m := (H_{50} - t) \cdot (B_{50} - t) \quad 4.22$

$$A_m = 2304 \quad (\text{mm})$$

Como se mencionó anteriormente, utilizando la analogía de la teoría de la membrana de Timoshenko es posible determinar el esfuerzo cortante que actúa la sección, argumentando que el producto del esfuerzo cortante multiplicado por el espesor de la pared es constante para una sección transversal aun cuando varía el espesor de la sección¹¹⁶. De la aplicación de la mencionada analogía se tiene:

Esfuerzo cortante a traves del
espesor
(Ref. [17,18])

$$\tau := \frac{T_u}{2 \cdot A_m \cdot t} \quad 4.23$$

$$\tau = 19.713 \quad (\text{MPa})$$

Aplicando la teoría de la Energía de la Distorsión para obtener el esfuerzo equivalente que represente el comportamiento del elemento en función del material que sea comparable con el esfuerzo de fluencia del mismo se tiene, en función de la nomenclatura presentada en 4.2.1.1.2:

¹¹⁶ Ref. [17, 18]

Limite de fluencia del material	$\sigma_{fl} := Fy$	
Limite al corte del material	$\tau_{fl} := 0.577\sigma_{fl}$	4.24
	$\tau_{fl} = 158.436$ (MPa)	

Por lo que el factor de seguridad al cual está trabajando elemento es

Factor de seguridad al corte del elemento	$F_s := \frac{\tau_{fl}}{\tau}$	4.25
	$F_s = 8.037$	

4.2.1.1.8 Análisis de resistencia a torsión global de la estructura.

Con ecuaciones planteadas, es posible ampliar del análisis y determinar los torques de diseño para los elementos tubulares presentes en estructura, que representan el 90% de los elementos empleados y, como se puede apreciar en las figuras 4.10 y 4.15 y en el Anexo I, son aquellos que soportan las mayores cargas.

Se excluirá del presente análisis los elementos de secciones abiertas (Z, C, etc.) por soportar cargas comparativamente menores que los tubulares y por representar únicamente el 10% de los elementos presentes en la estructura.

La siguiente tabla resume los torques de diseño determinados para los perfiles indicados:

Tabla 4.11 Torques de diseño para los elementos tubulares de la unidad Feline.

Elemento	Torque de diseño ϕT_n (N.mm)
T25X25X2	152 294.336
T40X40X2	423 640.222

T50X50X2	678 675.698
T50X50X3	967 163.255
T60X40X3	758 093.475
T100X50X2	1 390 402.61
T100X50X3	2 012 512.157

Del análisis de los valores de torque aplicado T_u mostrados en el Anexo I, se deduce que no existe elementos tubulares que fallen por torsión, salvo uno, el elemento 1414 de sección T40X40X2, el cual será analizado posteriormente.

Por lo tanto, la estructura en conjunto, presenta un comportamiento aceptable bajo los efectos de la torsión producida por las cargas externas. Es correcta también la verificación de la estructura bajo la acción de cargas axiales y flectoras, porque se ha demostrado que los esfuerzos cortantes producidos por los torques generados en cada elemento son soportados de manera satisfactoria.

4.2.1.1.9 Análisis de resistencia a esfuerzos combinados (flexión, fuerza axial).

A continuación se realiza el análisis considerando esfuerzos combinados en el elemento, aplicando los criterios de la HSS LRFD¹¹⁷.

La consideración inicial exige probar la relación entre la carga axial aplicada y la carga de diseño ($P_u/\phi P_n$):

$$\frac{P_u}{\phi P_n} = 0.021 \quad 4.26$$

Dado que $\frac{P_u}{\phi P_n} < 0.2$, la ecuación gobernante en el análisis del elemento 228 es la ecuación 7.1-2 de la Sección 7 de la HSS LRFD¹¹⁸ o su equivalente ecuación

¹¹⁷ Ref. [21,22]

H1-1b¹¹⁹, de la AISC LRFD, que otorga mayor importancia al fenómeno de flexión. Aplicando dicha ecuación se tiene:

$$\text{Ecuacion 7.1-2 (H1-1b)} \quad \frac{P_u}{2 \cdot \phi P_n} + \left(\frac{M_{33}}{\phi M_n} + \frac{m_{22}}{\phi M_n} \right) = 1.211 \quad 4.27$$

Dado que la ecuación anterior representa el porcentaje de utilización del elemento, es decir, cuánta capacidad del elemento está siendo utilizada, es evidente que el elemento falla por la influencia de efectos de flexión combinados con efectos de compresión, aunque resista los efectos de ambas cargas por separado.

4.2.1.1.10 Análisis de resistencia a esfuerzos cortantes combinados (torque, fuerza cortante).

Es importante también considerar el porcentaje utilización del elemento bajo la acción del torque aplicado de las fuerzas cortantes presentes, por lo que el porcentaje utilización para cada carga es:

$$\text{Porcentaje de utilizacion de capacidad a cortante} \quad \frac{V_{33}}{\phi V_n} = 0.222 \quad 4.28$$

$$\text{Porcentaje de utilizacion de capacidad a torque} \quad \frac{T_u}{\phi T_n} = 0.268 \quad 4.29$$

Donde se deduce que un 22% de la capacidad de resistencia a fuerza cortante y un 27% de la capacidad de resistencia a torque es utilizado. El efecto combinado de las fuerzas cortantes es

$$\text{Efecto combinado} \quad \frac{V_{33}}{\phi V_n} + \frac{T_u}{\phi T_n} = 0.489 \quad 4.30$$

¹¹⁸ Ref. [21]

¹¹⁹ Ref. [22]

4.2.1.1.11 Análisis de esfuerzos combinados globales.

La especificación HSS AISC LRFD propone la ecuación 7.2-1 para evaluar los efectos de los esfuerzos combinados actuantes sobre un elemento particular. Dado que todos los términos de la ecuación están definidos, de la aplicación de la misma resulta:

$$\text{(LRFD HSS Spec. 72-1)} \quad \left(\frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{M_{33}}{\phi M_n} \right) + \left(\frac{v_{22}}{\phi V_n} + \frac{T_u}{\phi T_n} \right)^2 = 1.247 \quad 4.31$$

Cabe destacar que el resultado difiere del numeral 4.2.1.1.9 en menos de 1% , por lo que se deduce que las cargas axiales y de flexión son las que producen los mayores efectos en los elementos estudiados.

4.2.1.1.12 Análisis de esfuerzos combinados globales.

A continuación se muestra el resumen de resultados de diseño que se obtiene de SAP2000, los cuales concuerdan con los anteriormente presentados.

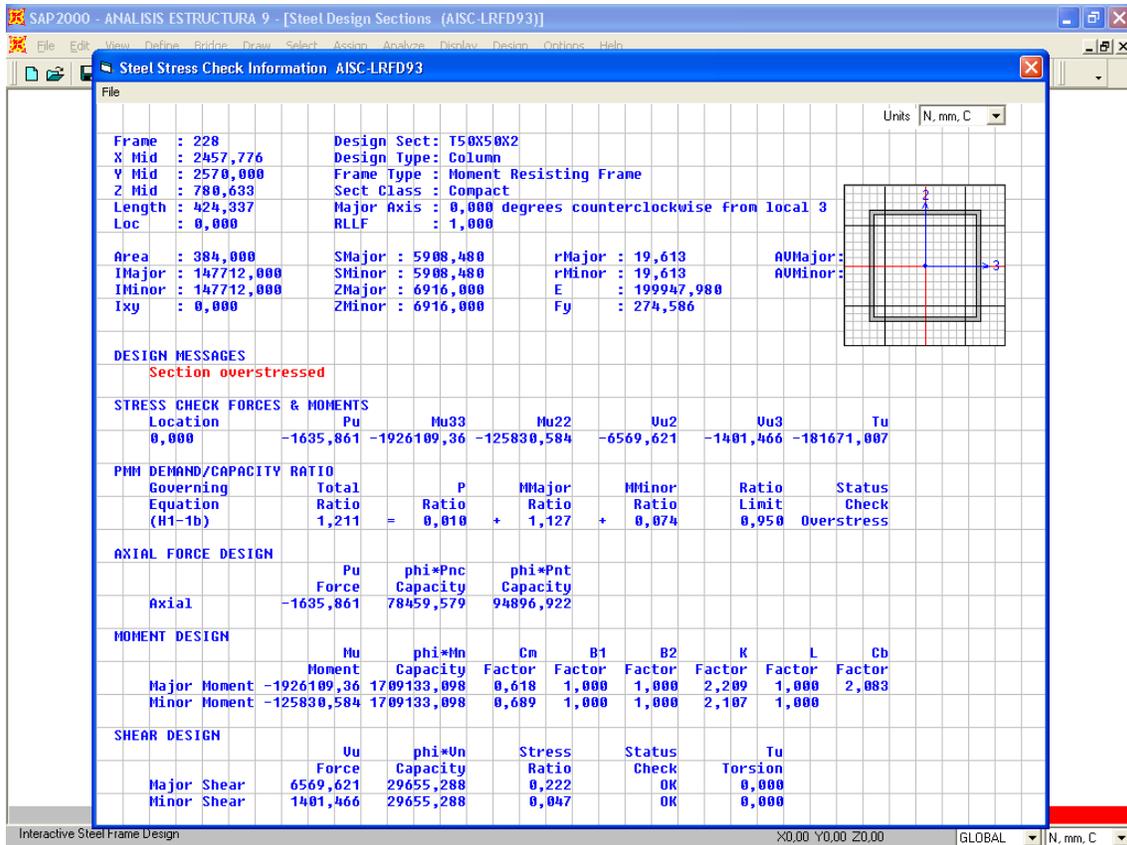


Fig. 4.27 Resumen de propiedades, cargas aplicadas, índice demanda/capacidad y resultados diseño detallado por el elemento 228

4.2.1.1.13 Análisis de resistencia a fatiga del elemento.

Como se observa en la figura 3.10, las cargas dinámicas actuantes sobre la estructura tienen naturaleza fluctuante y producen esfuerzos fluctuantes y efectos de fatiga en los elementos de la estructura¹²⁰.

Dado que el análisis se efectúa bajo la acción de la situación de carga 9 (SC9), que es una combinación de cargas estáticas y dinámicas, se considera que los esfuerzos generados de los elementos de la estructura tienen naturaleza fluctuante. Dadas las condiciones de utilización de las unidades de transporte,

¹²⁰ La fatiga se define como la falla que puede resultar en fractura después de un número suficiente de fluctuaciones de esfuerzo.

se considera, bajo premisa de criterio de ingeniería, que la incidencia de dichas cargas es de 10 veces cada día por 25 años¹²¹. Es decir, considerando las condiciones expuestas en 3.3.2.3.5 que se explican como graves irregularidades de la vía¹²², es razonable considerar que la unidad se expone a la incidencia de 10 de estas graves irregularidades en un día, que equivalen a 25 incidencias diarias en 10 años¹²³.

Por lo tanto, es aplicable el caso de carga 2 del Apéndice K3 de la Ref. [22], clasificándose los elementos de la estructura de la unidad Feline dentro de la categoría de esfuerzos A. De la tabla A-K3.3, el esfuerzo de diseño para fatiga es de 37 (ksi) ó 255.1 (N/mm²). Según las consideraciones de diseño de la Ref. [22], el rango de esfuerzo máximo con las cargas de servicio no debe exceder el esfuerzo de diseño para fatiga, es decir que el valor de σ_a no debe exceder dicho esfuerzo de diseño.

Para el elemento en análisis, a continuación se muestran los cálculos de los esfuerzos actuantes dependiendo de las cargas que los generan. Primeramente se muestra el esfuerzo normal de la fuerza axial en el elemento:

$$\begin{aligned} \text{Esfuerzo normal debido a fuerza axial} \quad \sigma_n &:= \frac{P_u}{A_g} && 4.32 \\ \sigma_n &= 4.266 && \text{(MPa)} \end{aligned}$$

Para el esfuerzo normal generado por el momento flector se debe considerar el máximo y el mínimo momentos actuantes, para lo cual se calcula dos esfuerzos normales debidos a flexión:

Maximo momento aplicado	$M_1 := 1926109.36$	(mmN)
Minimo momento aplicado	$M_2 := 125830.58$	(mmN)

¹²¹ Ref. [22], Tabla A-K3.1

¹²² Véase capítulo 3 inciso 3.3.2.3.5

¹²³ Se cita como referencia que el tiempo de vida útil de una unidad de transporte urbano es considerado de diez años. Véase Ref. [12]

$$\text{Esfuerzo normal maximo debido a momento flector} \quad \sigma_{f_max} := \frac{M_1 \cdot \frac{H_{50}}{2}}{I} \quad 4.33$$

$$\sigma_{f_max} = 325.991 \quad (\text{MPa})$$

$$\text{Esfuerzo normal minimo debido a momento flector} \quad \sigma_{f_min} := \frac{M_2 \cdot \frac{H_{50}}{2}}{I} \quad 4.34$$

$$\sigma_{f_min} = 21.297 \quad (\text{MPa})$$

Como se analizó en 4.2.1.1.7, el esfuerzo cortante generado en la sección viene dado por:

$$\text{Esfuerzo cortante} \quad \tau_c := \frac{T_u}{2 \cdot A_m \cdot t} \quad 4.35$$

$$\tau_c = 19.713 \quad (\text{MPa})$$

Es necesario acotar que dadas las bajas magnitudes de los esfuerzos cortantes y normales debidos a cargas axiales, sus valores no influyen en gran medida en el resultado¹²⁴, por lo tanto para el análisis de de fatiga según AISC se considera aquellos cuyas magnitudes son representativas y considerables, es decir los esfuerzos debidos a momentos flectores. El esfuerzo máximo determinado para dicho elemento según Ref. [22] es:

$$\text{Teoria AISC para fatiga de elementos estructurales} \quad \sigma_{max} := \frac{Se}{1 - \frac{M_2}{M_1}} \quad 4.36$$

$$\sigma_{max} = 272.93 \quad (\text{MPa})$$

Donde $Se = 255.1 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ es el intervalo de esfuerzo permisible tomado de Ref. [27]. Es evidente entonces que el elemento falla a fatiga porque el esfuerzo

¹²⁴ Ref. [27]

máximo permisible 272.93 (MPa) para el mismo es menor que el rango de esfuerzos actuante que es de 304 (MPa). El factor de seguridad es de $272/304 = 0.896$.

Como método alternativo, dada la naturaleza fluctuante de los esfuerzos, estos variarán alrededor de un esfuerzo medio σ_m , en una cantidad llamada esfuerzo alternante σ_a ¹²⁵. Las magnitudes de dichos esfuerzos son:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad 4.37$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad 4.38$$

Se calculan las magnitudes de los esfuerzos medio y alternante:

Esfuerzo medio $\sigma_m := \frac{\sigma_{f_max} + \sigma_{f_min}}{2}$

$$\sigma_m = 173.644 \text{ (MPa)}$$

Esfuerzo alternante $\sigma_a := \frac{\sigma_{f_max} - \sigma_{f_min}}{2}$

$$\sigma_a = 152.347 \text{ (MPa)}$$

La magnitud del esfuerzo alternante σ_a es menor que la magnitud del esfuerzo de diseño para fatiga de $Se = 255.1 \text{ (N/mm}^2\text{)}$, por lo que el elemento resiste a fatiga de manera apropiada. Aplicando la teoría de Soderberg, el factor de seguridad del elemento se determina por la siguiente expresión:

Teoría de Soderberg $FS := \frac{1}{\left(\frac{\sigma_a}{Se}\right) + \left(\frac{\sigma_m}{F_y}\right)} \quad 4.39$

$$FS = 0.813$$

¹²⁵ Ref. [26]

4.2.1.1.14 Análisis de resistencia a fatiga global de la estructura.

Es posible ampliar el análisis de resistencia a fatiga para todos los elementos de la estructura dado que criterio de análisis es el mismo aplicado para el presente elemento. Dicho análisis corresponde a la aplicación del método de la de AISC o la teoría de Soderberg, escogiéndose por versatilidad la segunda opción dado que los resultados son los mismos aproximadamente¹²⁶.

Una vez analizados se observa que todos los elementos de la estructura, en general, soportan las condiciones de fatiga analizadas. Existen, sin embargo, ciertos elementos que resultan de interés por su ubicación:

Tabla 4.12 Elementos que presentan esfuerzos medios y alternantes de consideración en el análisis de fatiga global de la unidad Feline.

NUM.	SECCIÓN	σ_{MAX} (N/mm ²)	σ_{MIN} (N/mm ²)	σ_m (N/mm ²)	σ_a (N/mm ²)	FACTOR DE SEGURIDAD
228	T50X50X2	-325.99	-21.30	-173.64	-152.35	0.81
853	T25X25X2	-327.72	-597.55	-462.63	134.91	0.86
1728	T25X25X2	-298.30	137.66	-80.32	-217.98	0.87
1727	T25X25X2	-295.45	-123.96	-209.70	-85.74	0.91
14	T100X50X2	-279.88	-40.24	-160.06	-119.82	0.95
1866	C50X25X2	-101.65	136.33	17.34	-118.99	2.48
449	T50X50X2	-33.64	387.86	177.11	210.75	5.52
389	T50X50X2	25.33	-226.09	-100.38	125.71	7.86
1414	T40X40X2	-24.33	229.60	102.64	-126.97	8.07

Los elementos 1727, 1728, 853 y 1414 pertenecen al respaldo de la unidad y son aquellos cuyos valores de esfuerzo alternante son los más altos del estructura. Los elementos 228 y 449 pertenecen al lateral derecho de la unidad. El elemento 389 pertenece a la estructura frontal. El elemento 14 pertenece al

¹²⁶ Véase 4.2.1.1.14

piso de la unidad, cerca del eje trasero y del lateral derecho. El elemento 1866 es constitutivo de los habitáculos de las llantas.

Es claro observar entonces, que los elementos más propensos a fatiga son los de la estructura de respaldo, elementos que se encuentran cerca del eje posterior de la unidad y elementos de la estructura frontal. Es pertinente reiterar que el resto de elementos presenta altos factores de seguridad a fatiga.

4.2.1.2 Elementos 449 y 1298

Constituyen los soportes de la abertura de la carrocería para alojar la puerta ingreso, que es una zona de alta concentración de esfuerzos por la interrupción de las líneas de fuerza de los elementos horizontales de las estructuras laterales (ver fig. 4.23). A continuación se resumen los cálculos de diseño efectuados para el mismo:

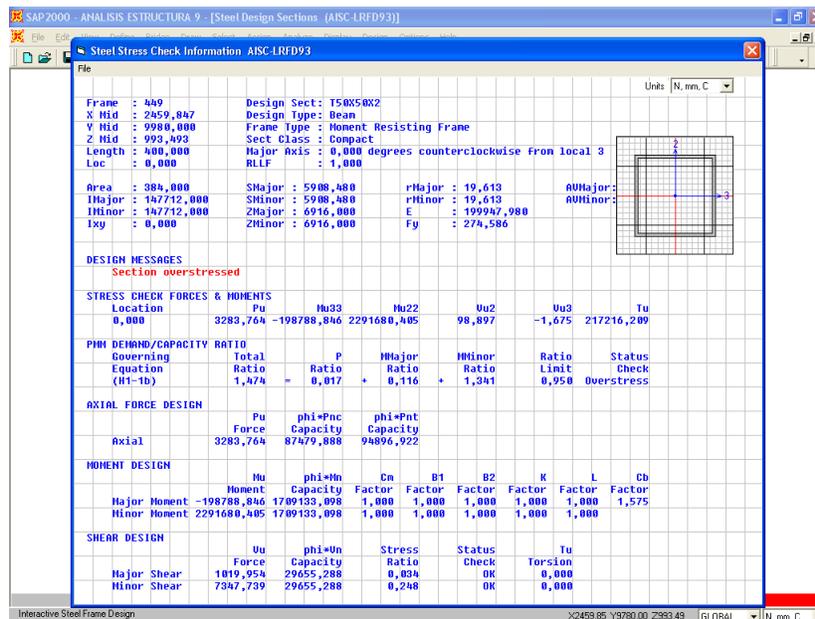


Fig. 4.28 Resumen de propiedades, cargas aplicadas, índice demanda/capacidad y resultados diseño detallado por el elemento 449

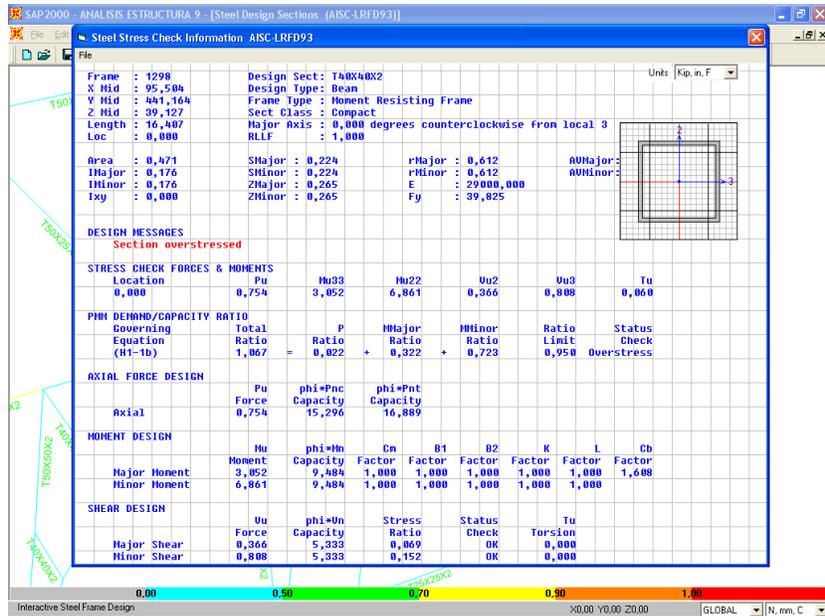


Fig. 4.29 Resumen de propiedades, cargas aplicadas, índice demanda/capacidad y resultados diseño detallado por el elemento 1298

4.2.1.3 Elemento 1727

Escogido como elemento representativo de la estructura posterior por presentar el mayor índice de utilización de los elementos de dicha estructura. A continuación los detalles del análisis de diseño:

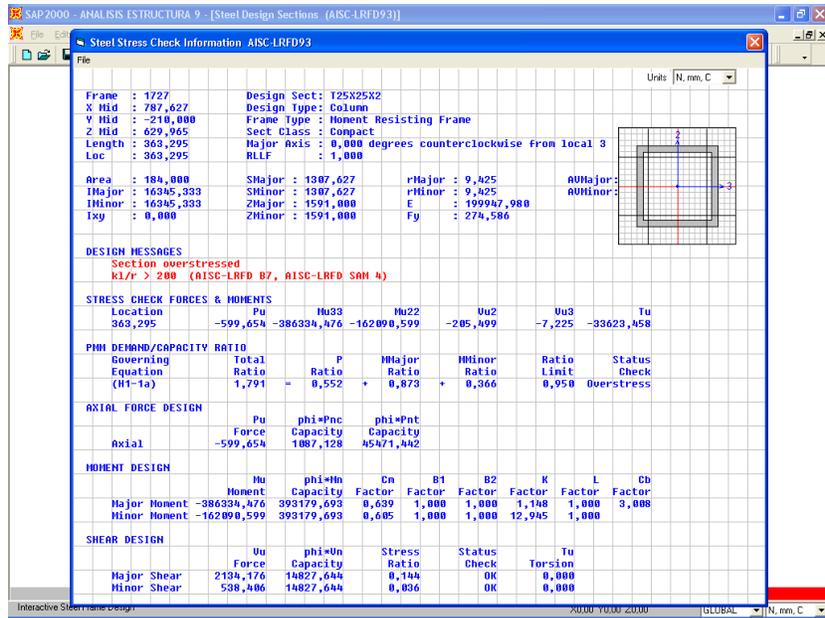


Fig. 4.30 Resumen de propiedades, cargas aplicadas, índice demanda/capacidad y resultados diseño detallado por el elemento 1727

4.2.1.4 Elemento 211

Es interesante el estudio del miembro 211 por ser columna soporte de ventanal ubicado cerca de la puerta de ingreso a la unidad, por lo que presenta una interesante distribución de esfuerzos:

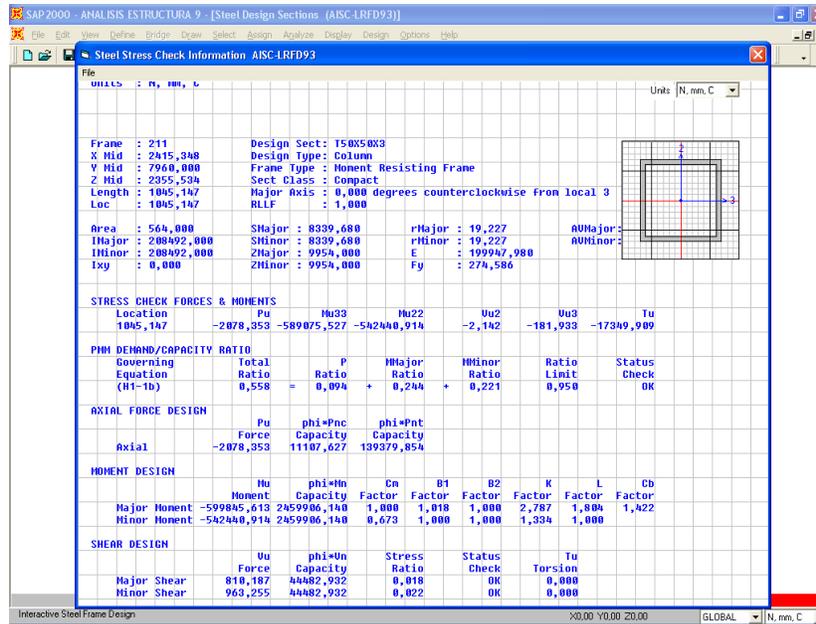


Fig. 4.31 Resumen de propiedades, cargas aplicadas, índice demanda/capacidad y resultados diseño detallado por el elemento 211

4.2.1.5 Elemento 1414

De acuerdo al análisis realizado en 4.2.1.1.8, es importante el análisis del elemento 1414 porque es el único elemento de la estructura completa que presenta fallo por baja resistencia a la torsión, además de que su resistencia a fatiga es cercana al límite permisible como se analizó en 4.2.1.1.14. A continuación se muestra los resultados del análisis torsional aplicado este elemento.

Dimensiones	Altura	$H_{40} := 40$	(mm)
	Ancho	$B_{40} := 40$	(mm)
	Espesor	$t := 2$	(mm)
Area total		$A_g := 304$	(mm^2)
Momento de inercia		$I := 73365.333$	(mm^4)
Radio de giro		$r := 15.535$	(mm)
Longitud		$l := 264.027$	(mm)

ANALISIS DE RESISTENCIA A COMPRESION

Factor de longitud efectiva		$k := 1$	
Parametro de esbeltez		$\lambda_c := \frac{k \cdot l}{\pi \cdot r} \sqrt{\frac{F_y}{E}}$	
		$\lambda_c = 0.2$	
Carga critica		$F_{cr} := 0.658^{\lambda_c^2} \cdot F_y$	
		$F_{cr} = 270.005$	(MPa)
Resistencia de diseno		$\phi P_n := \phi_c \cdot A_g \cdot F_{cr}$	
		$\phi P_n = 69769.418$	(N)
Carga aplicada		$P_u := 3070.670$	(N)

ANALISIS DE PANDEO LATERAL

Limite de esbeltez
(LRFD HSS SPEC. 2.3) $\frac{k \cdot l}{r} = 16.996$ => seccion compacta a traccion y compresion

Tasa de esbeltez $\lambda := \frac{H_{40} - 3t}{t}$

$$\lambda = 17$$

Resistencia a la fluencia axial

$$P_y := F_y \cdot A_g$$

$$P_y = 83474.144 \quad (\text{N})$$

Comparacion con resistencia a compresion

$$\frac{P_u}{\phi_b \cdot P_y} = 0.041 < 0.125$$

Tasa de esbeltez para combinacion de flexion y compresion axial

(Tomado de LRFD DESIGN SPECIFICATIONS

FOR STEEL HOLLOW STRUCTURAL SECTIONS, $\lambda_p = 90.058$

Seccion 2.2, Tabla 2.2)

$$\lambda_p := 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \cdot \left(1 - \frac{2.75 P_u}{\phi_b \cdot P_y} \right)$$

$\lambda < \lambda_p$ => SECCION COMPACTA
NO FALLA POR PANDEO LOCAL

ANALISIS DE RESISTENCIA A FLEXION

Momento elastico	$M_y := F_y \cdot S_1$	
	$M_y = 1007254.762$	(N·mm)
Momento plastico	$M_p := F_y \cdot Z$	
	$M_p = 1190604.896$	(N·mm)
Momento de disenno	$\phi M_n := \phi_b \cdot M_p$	
	$\phi M_n = 1071544.406$	(N·mm)

ANALISIS DE RESISTENCIA A FUZZAS CORTANTES

Area de resistencia a cortante	$A_w := 2 \cdot H_{40} \cdot t$	
	$A_w = 160$	(mm)
Limitantes para carga critica	$h := H_{40} - 3t$	
	$h = 34$	(mm)
	$\frac{h}{t} = 17$	$2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 66.113$
		$> h/t$
Resistencia critica a cortante	$F_n := 0.6 F_y$	
	$F_n = 164.752$	(MPa)
Resistencia de disenno	$\phi V_n := \phi_v \cdot A_w \cdot F_n$	
	$\phi V_n = 23724.23$	(N)

ANALISIS DE RESISTENCIA A TORSION

Resistencia critica a torsion
(LRFD HSS Spec. 61-3)

$$F_{cr_{torsion}} := 0.6F_y \quad (h/t < 66.113)$$

$$F_{cr_{torsion}} = 164.752 \quad (\text{MPa})$$

Constante torsional de corte
(LRFD HSS COMM. C6-3)

$$C_{HSS} := (B_{40} - t) \cdot (H_{40} - t) \cdot t - 4.5(4 - \pi)t^3$$

$$C_{HSS} = 2857.097 \quad (\text{mm}^3)$$

Torque de diseno
(LRFD HSS Spec. 61-1)

$$\phi T_n := \phi_T \cdot F_{cr_{torsion}} \cdot C_{HSS}$$

$$\phi T_n = 423640.222 \quad (\text{mm N})$$

Torque aplicado

$$T_u := 621417.286 \quad (\text{mm N})$$

ANALISIS DE ESFUERZOS COMBINADOS (FLEXION Y FUERZA AXIAL)

$$\frac{P_u}{\phi P_n} = 0.044$$

Dado que

$$\frac{P_u}{\phi P_n} < 0.2 \quad \Rightarrow \text{ECUACION GOBERNANTE: AISC SPECIFICATION H1-LRFD DESIGN SPECIFICATIONS FOR STEEL HOLLOW STRUCTURAL SECTIONS, Seccion 7, ec. 7.1-2}$$

$$\text{Ecuacion 7.1-2 (H1-1b)} \quad \frac{P_u}{2 \cdot \phi P_n} + \left(\frac{M_{33}}{\phi M_n} + \frac{m_{22}}{\phi M_n} \right) = 0.891$$

ANALISIS DE ESFUERZOS COMBINADOS (FUERZA CORTANTE Y TORQU)

$$\text{Porcentaje de utilizacion de capacidad a cortante} \quad \frac{V_{33}}{\phi V_n} = 0.032$$

$$\text{Porcentaje de utilizacion de capacidad a torque} \quad \frac{T_u}{\phi T_n} = 1.467$$

$$\text{Efecto combinado} \quad \frac{V_{33}}{\phi V_n} + \frac{T_u}{\phi T_n} = 1.499$$

ANALISIS DE ESFUERZOS COMBINADOS TOTALES

$$\text{(LRFD HSS Spec. 72-1)} \quad \left(\frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{M_{33}}{\phi M_n} \right) + \left(\frac{v_{22}}{\phi V_n} + \frac{T_u}{\phi T_n} \right)^2 = 2.963$$

La principal causa de falla en el elemento analizado es la falta de resistencia a la torsión, con porcentaje utilización que excede en 40% de la resistencia normal del elemento. En el análisis global, el porcentaje de falla es alto.

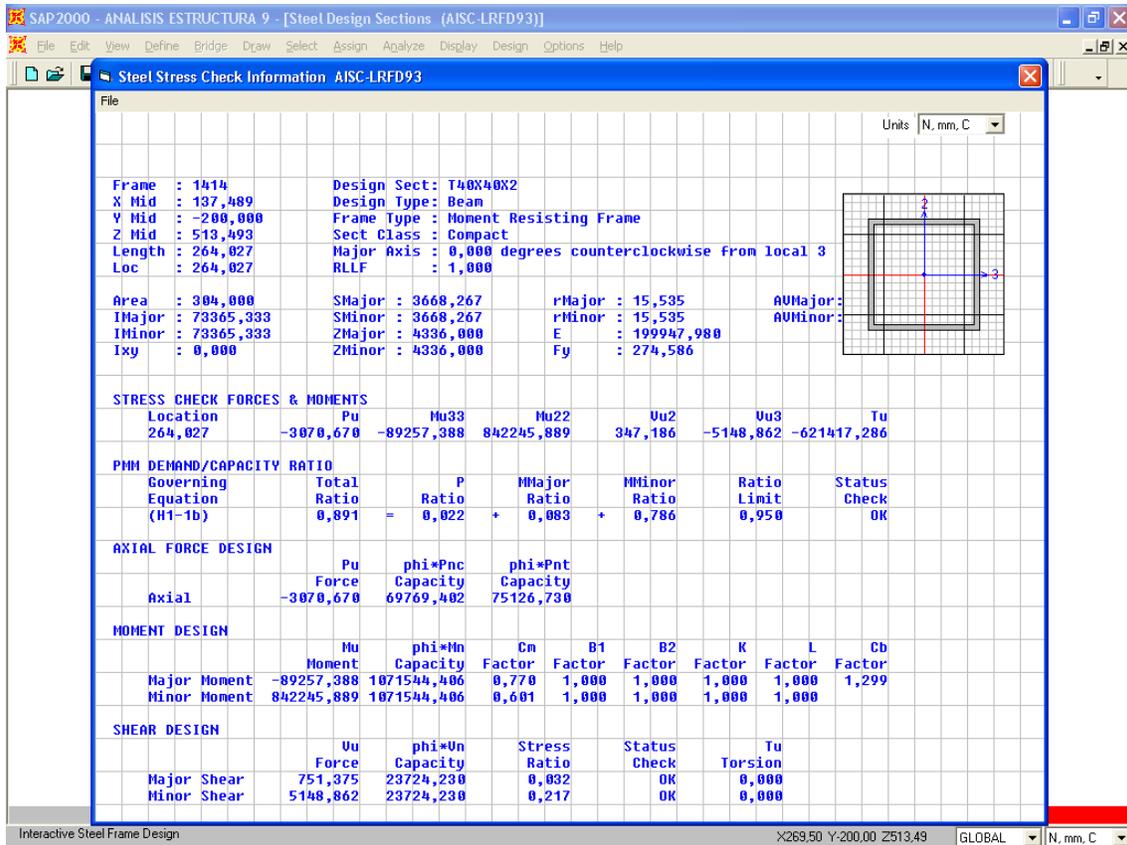


Fig. 4.32 Resumen de propiedades, cargas aplicadas, índice demanda/capacidad y resultados diseño detallado por el elemento 1414

4.2.2 ELEMENTOS DE CONEXIÓN.

4.2.2.1 Angulo de anclaje (zona de transición cajuela-piso).

Del análisis general de las conexiones presentes en la estructura de la unidad Feline, se deduce que aquellas que se encuentran sujetas a mayores cargas, que implican seguridad para la unidad y que por lo tanto deben ser estudiadas son los anclajes de la carrocería al chasis.

Dentro de este apartado, el principal elemento de conexión estudiado es el ángulo izquierdo de soporte del chasis en la zona de transición cajuela-piso por considerarse pieza fundamental para la seguridad estructural de la unidad.

Cabe recordar que el análisis global de esta zona se presentó en el apartado 4.1.5.1, donde se definió las cargas actuantes en el conjunto y se observó los cuatro anclajes que componen el conjunto sometido a la SC9 (carga crítica). Por lo tanto, continuación se resumen los resultados de dicho análisis enfocados en el ángulo de anclaje y las uniones soldadas.

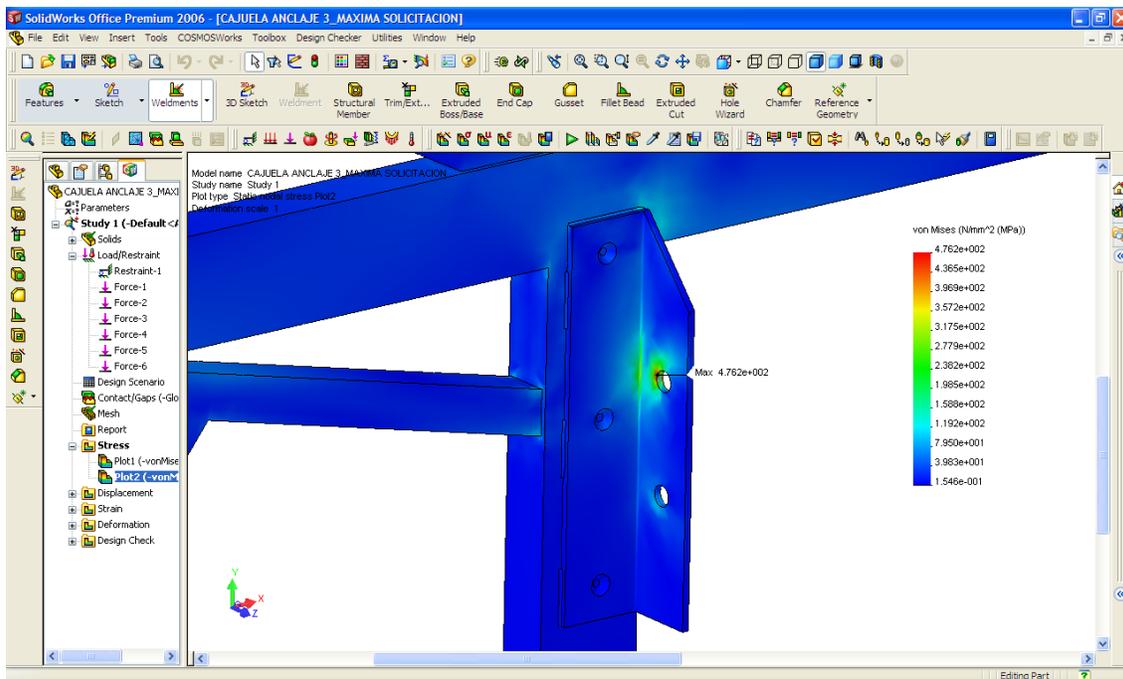


Fig. 4.31 Distribución de esfuerzos en el lado interno del ángulo de anclaje delantero izquierdo (mayor concentración de esfuerzos del conjunto)

La zona de los pernos de anclaje al chasis presenta la mayor concentración de esfuerzos por ser una discontinuidad en tal superficie. Como era de esperarse, en varios puntos los esfuerzos superan los límites del material.

Las juntas soldadas de filete (intermitente, 3(mm) de tamaño) definidas para el ángulo de anclaje análisis, como se observa figura, no presentan grandes concentraciones esfuerzos, por lo que se consideran adecuadas.

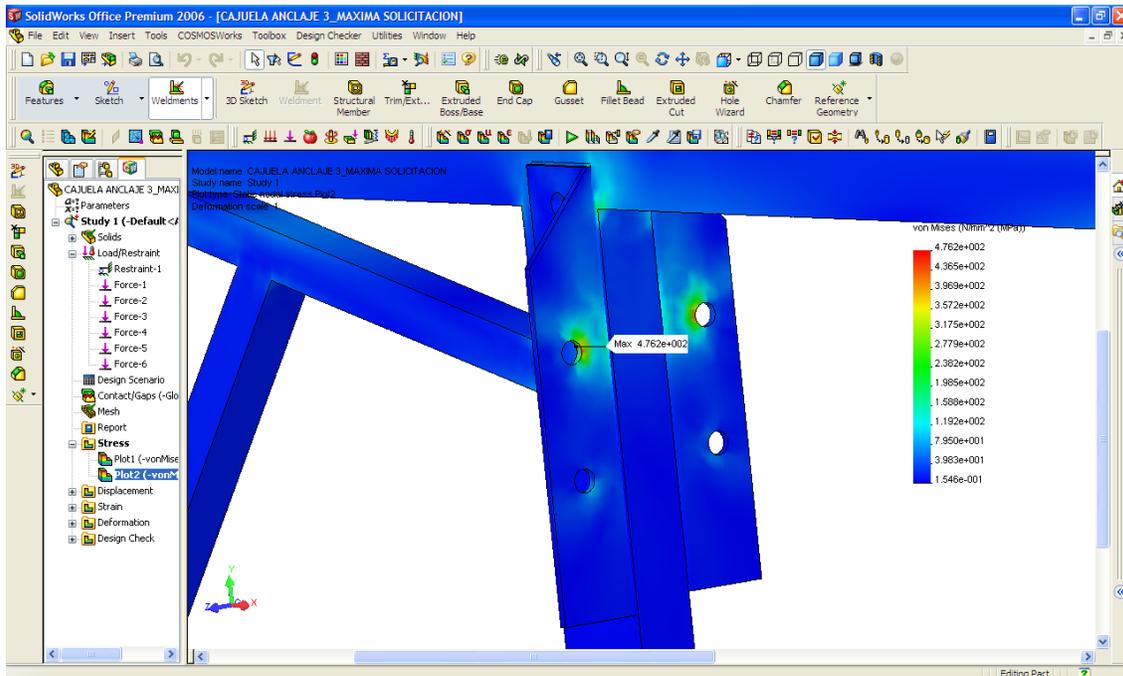


Fig. 4.32 Distribución de esfuerzos en el lado de conexión al chasis del ángulo de anclaje delantero izquierdo (mayor concentración de esfuerzos del conjunto)

Es interesante notar la similitud de la distribución de esfuerzos entre los ángulos presentes en la junta, como se observa en la figura anterior, en la que se evidencia que el ángulo delantero y posterior del lado izquierdo presentan distribuciones esfuerzos similares.

4.2.2.2 Junta lateral sobre abertura para neumático derecho.

Es importante el estudio de la junta lateral derecha sobre el neumático posterior para observar los efectos de las cargas transmitidas desde el piso de la unidad hacia las estructuras laterales que son las encargadas de absorberlas.

A continuación se muestra el modelado de la junta lateral derecha¹²⁷:

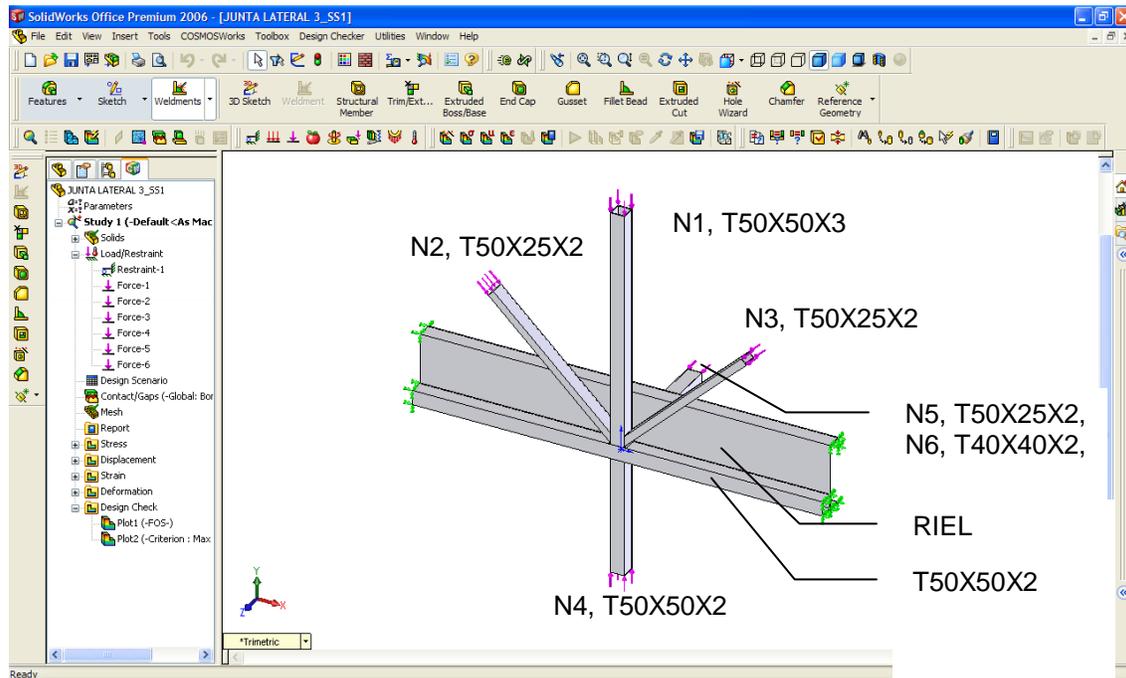


Fig. 4.33 Modelado y aplicación de cargas en junta lateral sobre abertura para neumático derecho.

El modelado ideal consiste en conectar el tubo T50x50x2 y el riel de asientos con las rigideces de unión con el resto de la estructura. Pero, al no disponer de datos acerca de la misma, lo más cercano a la realidad es fijar estos elementos para observar como se comportan ante las cargas externas¹²⁸. Tomando en cuenta las consideraciones analizadas en 4.1.5.1, las cargas axiales actuantes en la junta analizada son:

Tabla 4.13 Cargas de análisis aplicadas a la junta lateral sobre abertura para neumático derecho.

Carga	Tipo de resultado	Fuerza axial P (N)
N1	Máximo	10267

¹²⁷ Para ubicación espacial ver fig. 4.25

¹²⁸ Ref. [27]

N2	Máximo	10113
N3	Máximo	5430
N4	Máximo	8996
N5	Máximo	3720
N6	Máximo	23278

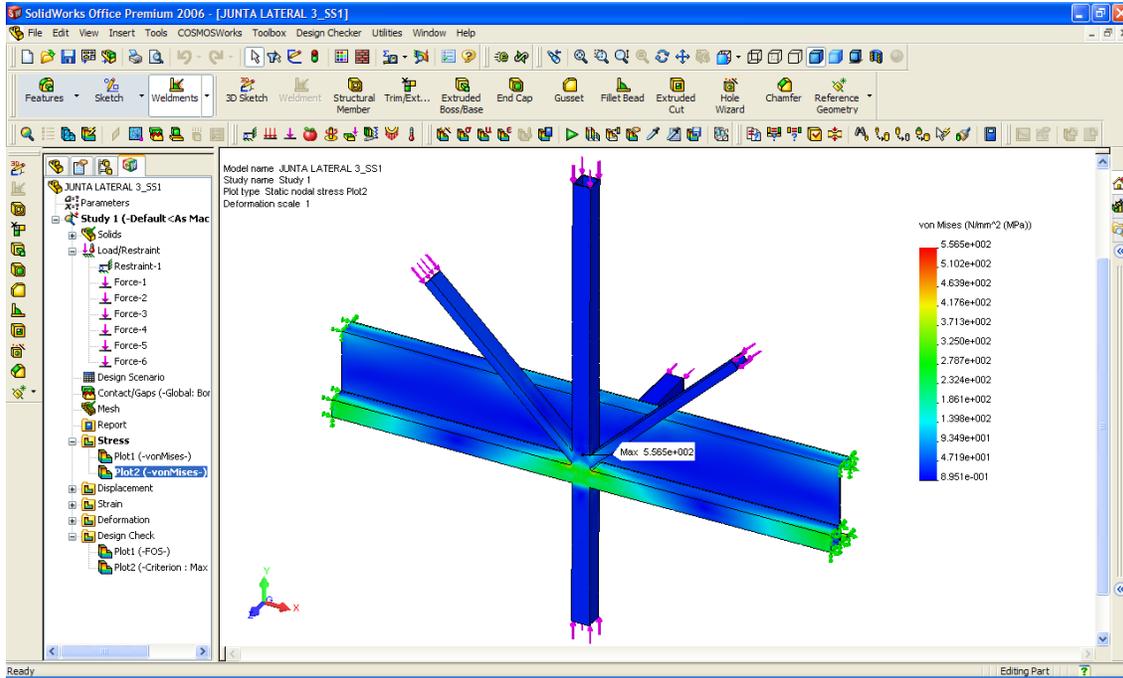


Fig. 4.34 Distribución de esfuerzos en la parte delantera de la junta

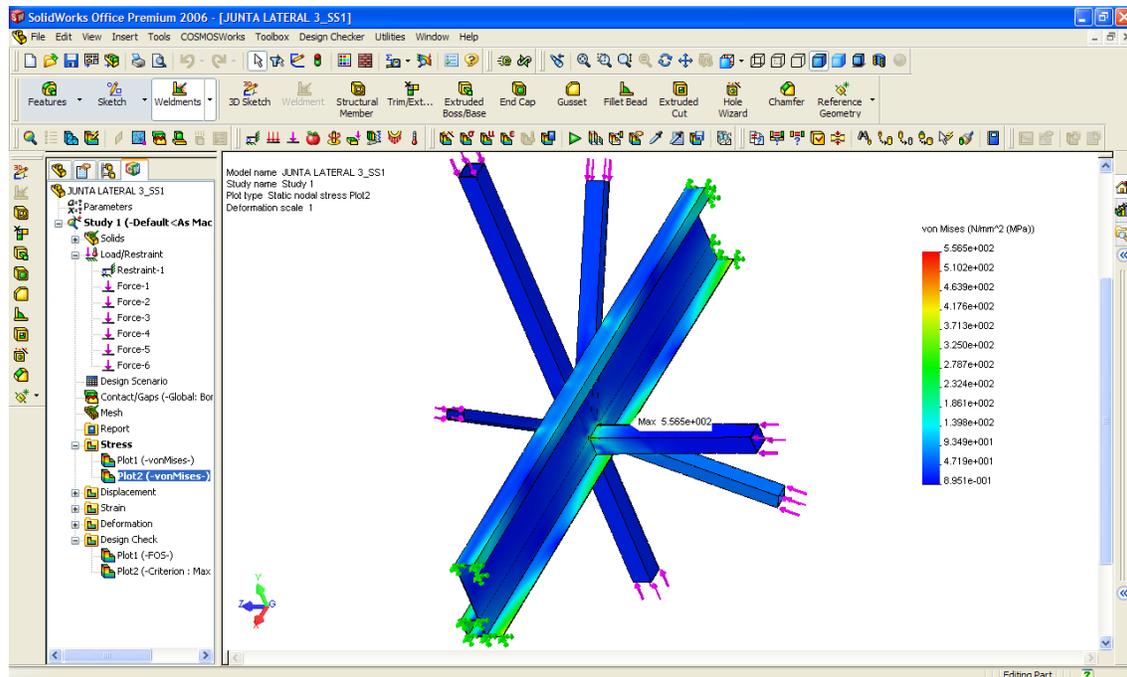


Fig. 4.35 Distribución de esfuerzos en la parte posterior de la junta

De los resultados obtenidos se observa una concentración de esfuerzos importante en la unión, donde se conectan todos los elementos porque es el sitio que recibe las cargas desde el piso y los transmite hacia el resto de la estructura lateral. Cerca de los puntos de unión soldada los esfuerzos alcanzan valores no deseados (sobre los 400(MPa))

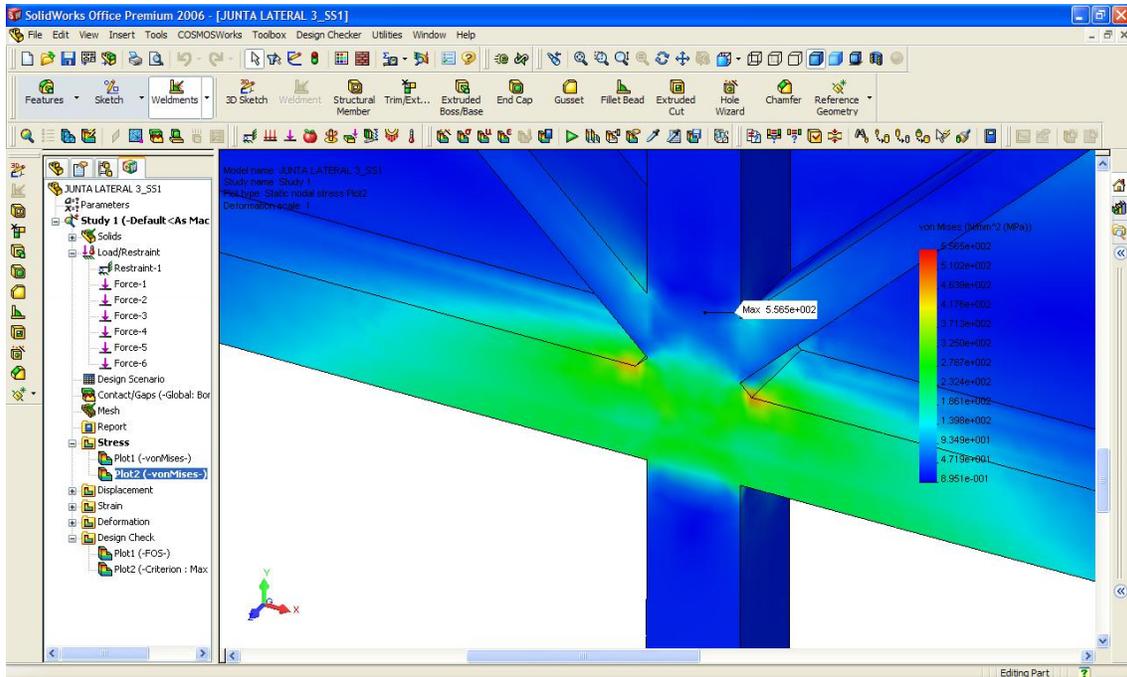


Fig. 4.36 Distribución de esfuerzos en la soldadura horizontal-vertical de la parte delantera de la junta

La soldadura mostrada en la fig. anterior es de 3 (mm) de tamaño y presenta en sus bordes altos esfuerzos en puntos localizados.

4.2.2.3 Pernos de anclaje al chasis.

Dada la complejidad de la geometría y de la aplicación de las cargas en el anclaje posterior, es necesario modelar el mismo con la presencia de los pernos para analizar su comportamiento. Cabe recalcar que se ha escogido el estudio de dicha junta por ser la que presenta mayores esfuerzos en el análisis en SAP2000 y por encontrarse en una zona de transición, por lo que los efectos de las cargas son grandes. Las cargas utilizadas son las mismas que en 4.1.5.1. El resto de juntas presentes en la estructura presentan esfuerzos menores.

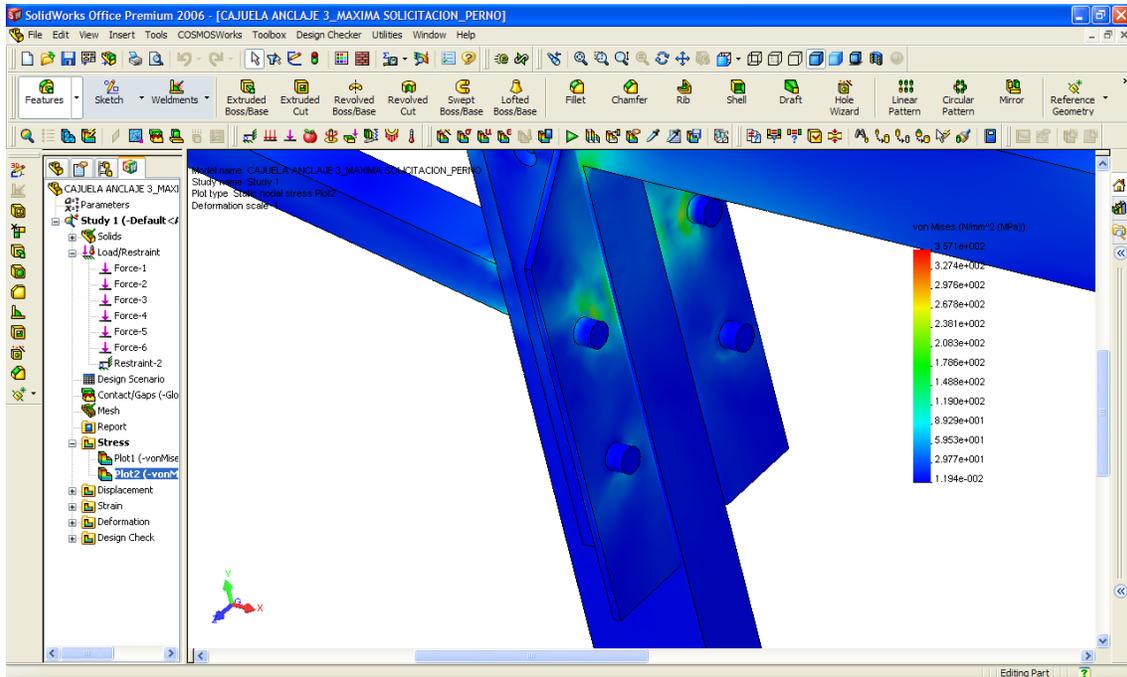


Fig. 4.37 Distribución de esfuerzos en el perno de anclaje carrocería-chasis

Se puede deducir de los resultados mostrados en la fig. anterior que los pernos soportan los esfuerzos a los cuales están sometidos por efecto de las cargas externas a la estructura, llegando a niveles de 89 (MPa) en las zonas de unión con los ángulos.

4.3 ZONAS SOBREDIMENSIONADAS.

Las principales zonas sobredimensionadas constituyen el techo, el piso de las cajuelas y la estructura frontal

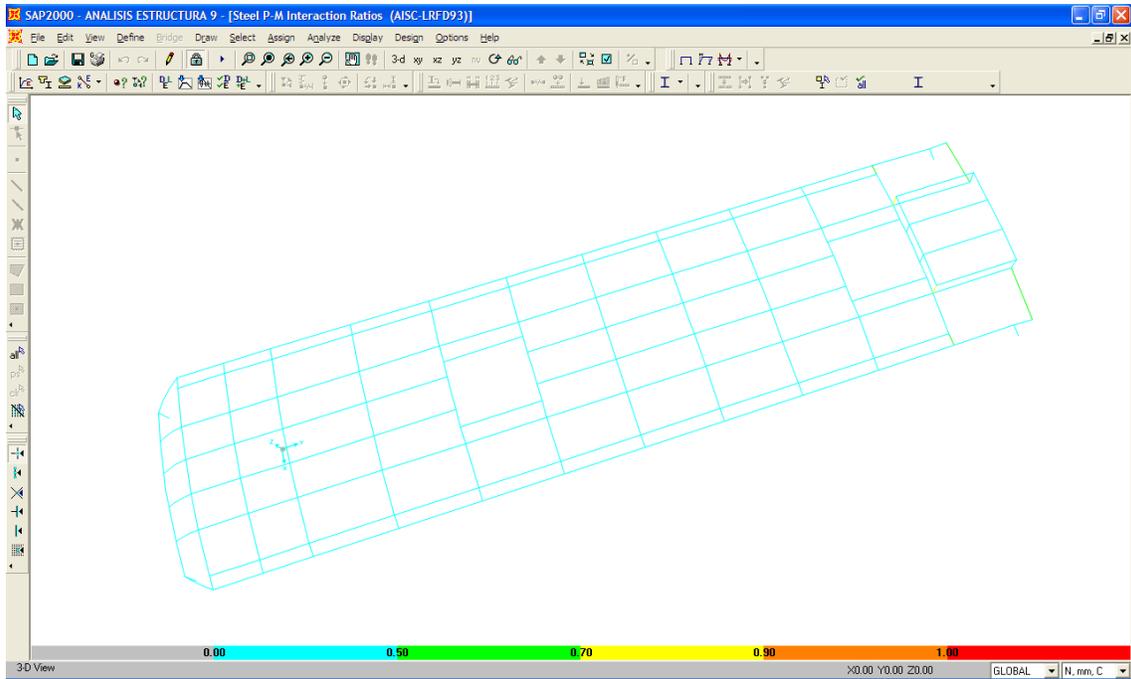


Fig. 4.38 Distribución de esfuerzos en el techo de la unidad

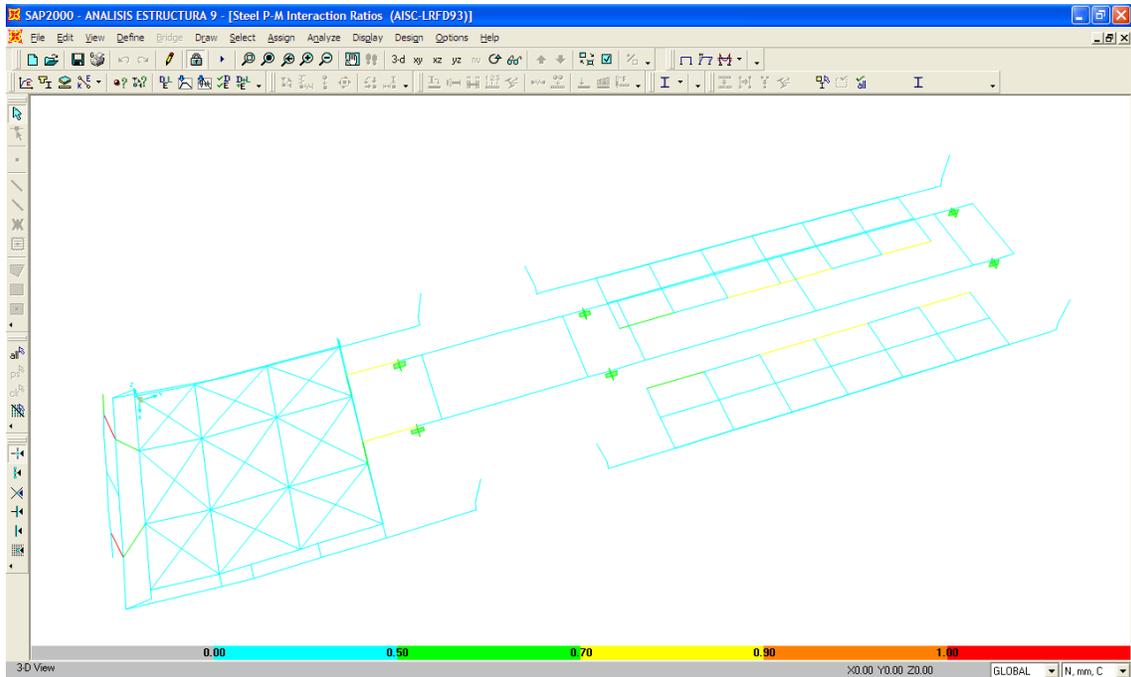


Fig. 4.39 Distribución de esfuerzos en los pisos de las cajetas posterior y laterales de la unidad

4.4 MIEMBROS SUBUTILIZADOS.

Los miembros pertenecientes a las zonas mencionadas no presentan distribuciones de carga que demanden alta sollicitaciones, es decir sus distribuciones de carga son lo suficientemente bajas para que los miembros soporten las mismas de manera confiable. Sin embargo, dada su baja utilización, se encuentran subutilizados.

CAPITULO 5

REDISEÑO

5.1 MODIFICACIÓN DE GEOMETRÍA DE ZONAS CRÍTICAS

5.1.1 INTRODUCCIÓN.

El presente capítulo persigue recomendar modificaciones en el sistema estructural de la unidad Feline en aspectos tales como:

- Rediseño y refuerzo de zonas críticas vulnerables.
- Cambio de propiedades de miembros sujetos a falla.
- Cambio o rediseño en de zonas y miembros sobredimensionados.

Tales recomendaciones pretenden contribuir a la optimización del diseño de la estructura de la unidad, tanto en la utilización de los materiales como en la geometría y esta manera asegurar la resistencia de la misma.

5.1.2 PROPUESTA DE REDISEÑO.

Una vez analizados los resultados del estudio del comportamiento de la unidad Feline bajo cargas de trabajo realistas y mayoradas, con ayuda a los programas de cómputo especializados¹²⁹, se propone rediseñar la estructura como los cambios detallados a continuación para contribuir la optimización de la misma bajo las condiciones de trabajo establecidas:

¹²⁹ Véase Capítulo 4.

5.1.2.1 Piso y anclajes

- Quitar miembro intermedio de la estructura del piso.
- Aumentar espesor del larguero transversal en la zona de transición cajuela posterior-piso.
- Aumentar espesor del larguero transversal en el voladizo (sobre cajuela trasera).
- Considerar el aumento de espesor de los largueros transversales sobre las cajuelas intermedias.
- Reducir número de apoyos estructurales de sujeción al chasis.

5.1.2.2 Laterales

- Disminuir propiedades del parante delantero de la puerta de ingreso.
- Disminuir propiedades de los refuerzos debajo de ventanas.
- Rediseñar las zonas de albergue de los neumáticos; reforzar miembros de soporte exterior adyacentes.
- Aumentar espesor de los miembros de soporte de los parantes de la puerta de ingreso.
- Rediseño de las zonas anterior y posterior a la puerta de ingreso. Refuerzo de los miembros de soporte.
- Rediseño de la zona de anclaje de la estructura lateral al respaldo.

5.1.2.3 Frente

- Quitar refuerzos en la zona frontal; reducir espesores en elementos que lo ameriten¹³⁰.

5.1.2.4 Respaldo

- Incrementar espesor de miembros que soportan los faros posteriores.
- Reforzar el anclaje intermedio del respaldo a la cajuela posterior .

5.1.2.5 Techo

- Quitar arco de refuerzo del techo que sobre la cajuela.
- Reforzar elementos verticales iniciales de soporte de cúpula (zona de transición).

5.1.2.6 Cajuelas

- Disminución de propiedades en piso de cajuelas.

5.1.3 ZONAS CRÍTICAS SUSCEPTIBLES DE MODIFICACIÓN.

En el apartado anterior se clasificaron las propuestas de rediseño de acuerdo a las zonas de la estructura donde se aplican. Es importante, sin embargo, clasificar las mismas de acuerdo a las acciones que se van a realizar. Por lo tanto, las zonas críticas susceptibles de modificación de la estructura de la unidad Feline consideradas son:

¹³⁰ Es posible realizar el cambio propuesto para el frente de la unidad si se realizan estudios de impacto frontal de la misma, el cual es tema de investigaciones posteriores y se encuentra fuera del alcance del presente proyecto.

- Estructuras laterales para el rediseño las zonas de los neumáticos posteriores y anteriores.
- Estructuras laterales para el rediseño de las zonas anterior y posterior a la puerta de ingreso.
- Estructuras laterales y respaldo para el rediseño de las zonas de anclaje lateral e intermedio de la estructura lateral al respaldo.
- Respaldo para el rediseño del panel principal de soporte de fibra de vidrio posterior.

A continuación se analiza en forma detallada los cambios propuestos para zonas críticas consideradas.

5.1.4 ESTRUCTURAS LATERALES. ZONAS DE ALBERGUE DE LOS NEUMÁTICOS.

Es necesario el mejoramiento de la geometría de las zonas de los neumáticos para absorber de manera segura y efectiva los esfuerzos producidos por las irregularidades de las vías por las cuales transita la unidad. Por lo tanto, a continuación se muestran los cambios en la geometría de dicha zona.

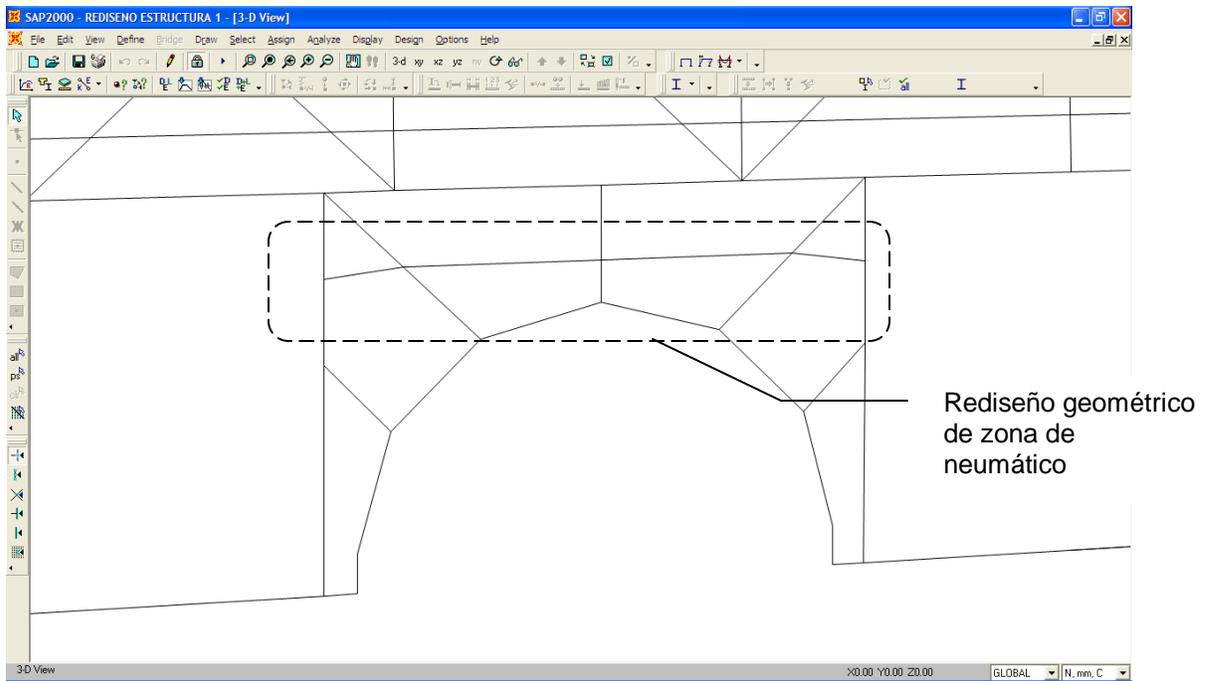


Fig. 5.1 Rediseño de zona de los neumáticos.

5.1.5 ESTRUCTURAS LATERALES. ZONAS ANTERIOR Y POSTERIOR A LA PUERTA DE INGRESO.

Dado que la puerta de ingreso a la unidad es una zona de concentración de esfuerzos, es necesario reforzar la misma para evitar futuros fallos de la estructura.

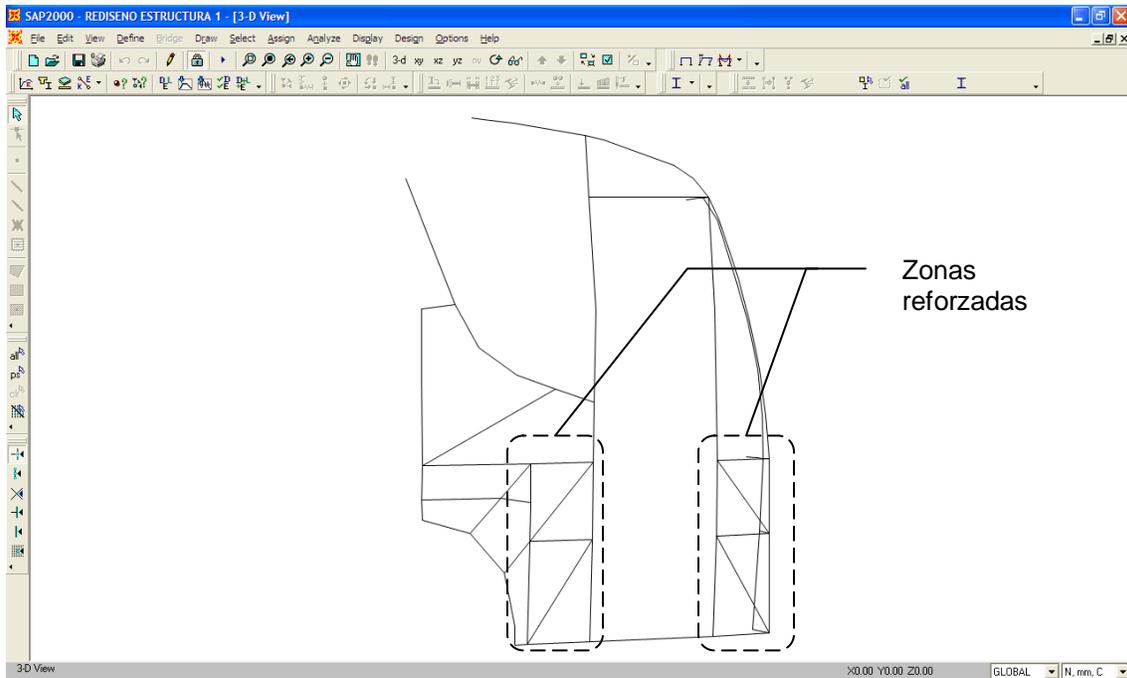
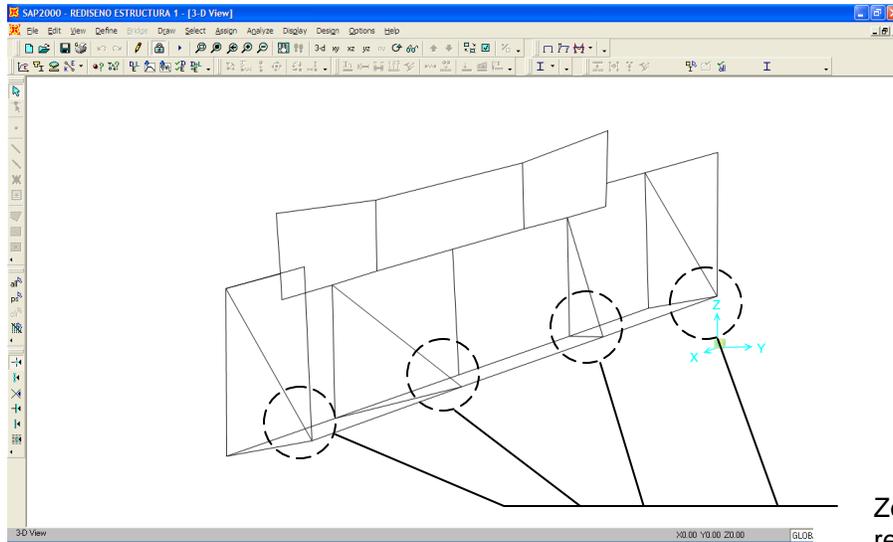


Fig. 5.2 Refuerzo de zona de puerta de ingreso.

5.1.6 RESPALDO. ZONAS DE ANCLAJE LATERAL E INTERMEDIO DE LA ESTRUCTURA LATERAL AL RESPALDO.

Como se analizó en el capítulo anterior, los anclajes del respaldo a los laterales y cajuelas posteriores constituyen zonas críticas de la estructura para absorber las cargas externas que actúan sobre la misma.

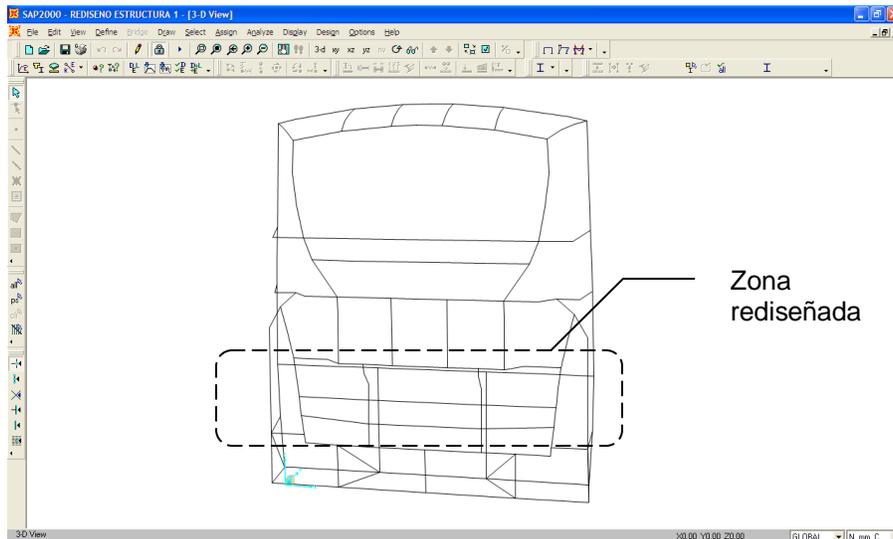


Zonas reforzadas

Fig. 5.3 Refuerzo de uniones respaldo-laterales.

5.1.7 RESPALDO. ZONAS CENTRAL DE SOPORTE DE FIBRA DE VIDRIO POSTERIOR.

En la parte central del respaldo se presenta una zona donde los esfuerzos son altos debido a la combinación de efectos procedentes de las estructuras laterales. Es decir, esta zona absorbe los efectos de ambas estructuras y constituye el medio de unión de las mismas.



Zona rediseñada

Fig. 5.4 Refuerzo de zona central del respaldo.

5.2 CAMBIO DE PROPIEDADES DE MIEMBROS SOBRE – ESFORZADOS

Es importante realizar los cambios de propiedades de miembros sobre-esforzados para mantener la fiabilidad de la estructura y su respuesta favorable ante cargas máximas. Por lo tanto se recomienda los siguientes cambios en miembros de la misma:

- Incremento del espesor de todos los largueros transversales detrás del eje posterior. El nuevo espesor será de tres milímetros para asegurar su resistencia frente a las cargas externas.
- Incremento del espesor de largueros transversales delante del eje posterior. Su espesor será de tres milímetros.
- Incremento del espesor de largueros transversales sobre cajuelas laterales. De igual manera, su nuevo espesor será de tres milímetros.
- Incremento del espesor del miembro vertical detrás de la abertura para los neumáticos. El nuevo espesor del elemento es tres milímetros.
- Incremento del espesor de los miembros de soporte de los parantes de la puerta de ingreso. Para estos miembros utilizaron tubos de 50 milímetros de lado y de tres milímetros de espesor.
- Incremento del espesor de miembros que soportan los faros posteriores. Su espesor actual es de tres milímetros con secciones de 40 milímetros de lado.
- Refuerzo de elementos verticales iniciales de soporte de cúpula (zona de transición). Se utilizaron secciones de 40 milímetros de lado y dos milímetros de espesor.

5.3 MODIFICACIÓN DE GEOMETRÍA DE ZONAS SOBREDIMENSIONADAS

Ciertas zonas de la estructura no presentan esfuerzos que comprometan la integridad de la misma. Es posible, por lo tanto, cambiar la geometría de ciertas de ellas en pos de una correcta utilización en los materiales. Las zonas consideradas para este efecto son:

- Zona de cajuelas para reducción del número de apoyos estructurales de sujeción al chasis.
- Eliminación del arco de refuerzo del techo que sobre la cajuela.

5.3.1 ZONA DE CAJUELAS PARA REDUCCIÓN DEL NÚMERO DE APOYOS ESTRUCTURALES DE SUJECIÓN AL CHASIS.

El principal interés de los poseedores de una unidad de transporte interprovincial es que la misma tenga una gran capacidad de carga, de tal manera que sus compartimientos para la misma sean lo más amplios que sea posible para dar albergue a los requerimientos de los viajeros. Con esta premisa, se propone el rediseño la unidad de transporte Feline de modo que sus cajuelas laterales aumenten su capacidad de carga en un 30% (15% a cada lado) mediante eliminación de los anclajes al chasis anteriores al eje posterior de la unidad. A continuación se muestra las comprobaciones de diseño para avalar la propuesta:

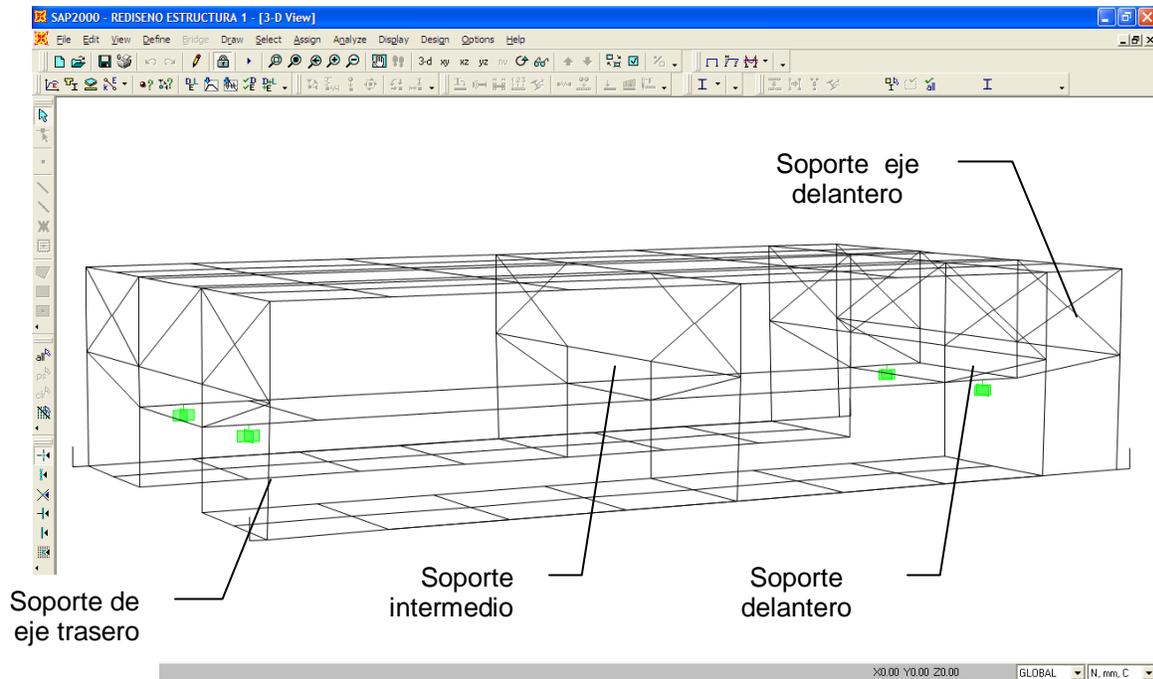


Fig. 5.5 Rediseño de las cajuelas laterales.

Cabe destacar que el cambio realizado es la única eliminación posible debido a que el soporte delantero (ver Fig. 5.5) forma uno de los pórticos soportan mayor carga en toda la estructura debido a su ubicación central y aquel tesoro directamente los esfuerzos de las cargas externas por su conexión directa con el piso de la unidad.

5.3.2 ELIMINACIÓN DEL ARCO DE REFUERZO DEL TECHO QUE SOBRE LA CAJUELA

Dado que el techo, en general, no soporta esfuerzos de grandes magnitudes, es posible retirar ciertos elementos que, sin comprometer aspectos constructivos en la unidad, no revisten gran aporte a la resistencia estructura de la unidad en conjunto. Es así que se propone la eliminación del arco de refuerzo del techo sobre la cajuela, por lo que a continuación se muestran las comprobaciones de diseño de tal propuesta:

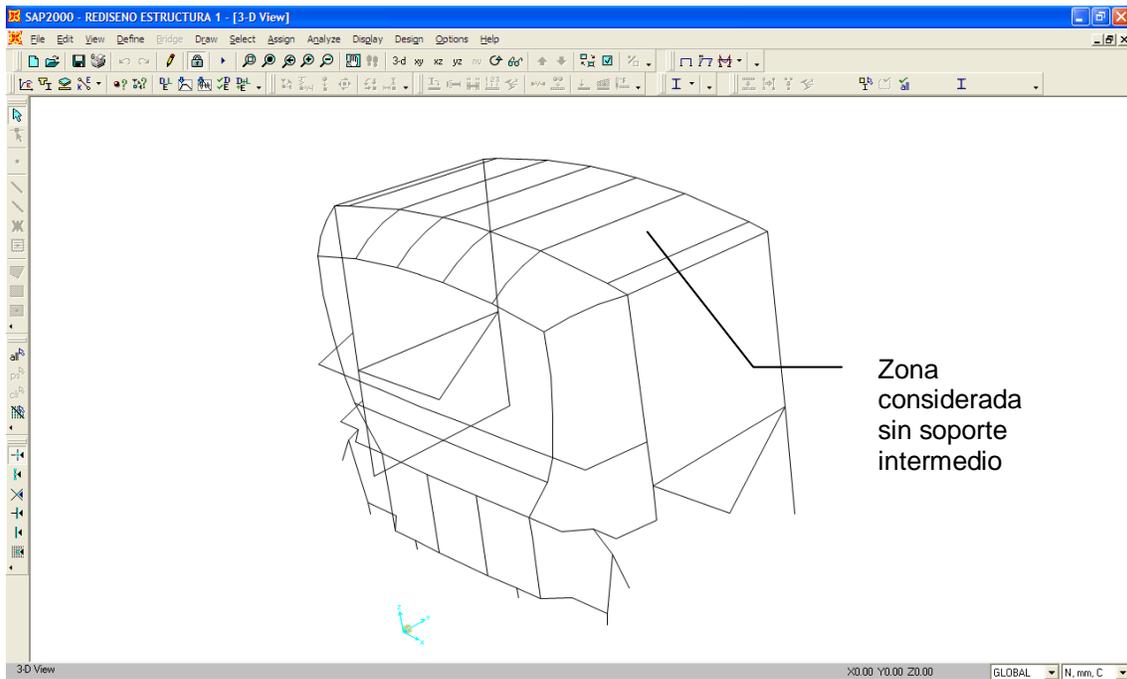


Fig. 5.6 Eliminación de soporte intermedio.

5.4 CAMBIO DE PROPIEDADES DE MIEMBROS SUB – ESFORZADOS

Como se mencionó en 5.3, existen miembros de la estructura que no se encuentran solicitados en gran medida, por lo que es posible la reducción en las propiedades de dichos elementos para contribuir a la correcta utilización de los materiales. Los cambios recomendados son los siguientes:

- Eliminar miembro intermedio de la estructura del piso. El margen de sollicitación de dicho elemento es relativamente bajo y es posible eliminación del punto de vista constructivo ya que no afecta el armado del piso de la unidad.
- Disminución de propiedades del parante delantero de la puerta de ingreso. Dado que los esfuerzos se concentra en el parante posterior y

- sus soportes es posible la reducción de propiedades del delantero con secciones de 40 milímetros de lado de los milímetros de espesor.
- Disminución propiedades de los refuerzos debajo de ventanas. Estos refuerzos tiene la misión de distribuir los esfuerzos provenientes del piso de la unidad, por lo tanto su margen de sollicitación amerita el cambio por una sección de 40 milímetros de lado y dos milímetros de espesor. Los miembros rediseñados son los refuerzos inclinados y los verticales que no forman pórticos.
 - Disminución de propiedades en piso de cajuelas. De acuerdo a los análisis realizados en el capítulo anterior es claro que los miembros que conforman el piso de las cajuelas tanto laterales, posterior soportan las cargas requeridas de manera satisfactoria con los miembros analizados (T50X50X2), por lo que se propone reemplazar dichos miembros con perfiles C (C50X25X2) por considerarse una sección que posee la suficiente resistencia para soportar los esfuerzos requeridos y por contribuir esta manera la optimización de diseño del estructura.

5.5 COMPROBACIONES DE DISEÑO

La siguiente etapa en el rediseño del estructura de la unidad Feline de Miral es la comprobación de los cambios propuestos para determinar su factibilidad en la construcción de la misma.

Las comprobaciones pretenden demostrar que los cambios realizados son completamente aplicables desde el punto de vista de diseño y son factibles desde el punto de vista de la construcción.

Es claro que la aplicabilidad de punto de vista de diseño implica que le estructura soporte las mismas cargas a la que fue sometido en diseño original, debiendo existir una distribución de esfuerzos aplicados que asegure que el rediseño cumple con los requerimientos de seguridad que se exigió para diseño original.

5.5.1 COMPROBACIÓN DE RESISTENCIA RESPECTO A ESFUERZOS APLICADOS.

A continuación se muestran las comprobaciones de diseño realizadas a la nueva estructura concebida, la cual lleva aplicada las mismas cargas que original. Como se analiza el capítulo 4, las comprobaciones de diseño se hacen bajo los parámetros de la AISC LRFD¹³¹, por lo que las condiciones de análisis son las mismas que las empleadas para el diseño original.

Es importante observar las zonas detalladas anteriormente en las que se ha realizado cambios en la geometría del estructura y los miembros cuyas propiedades han cambiado¹³².

¹³¹ Ref. [21,22]

¹³² Véase Capítulo 4, inciso 4.2.1

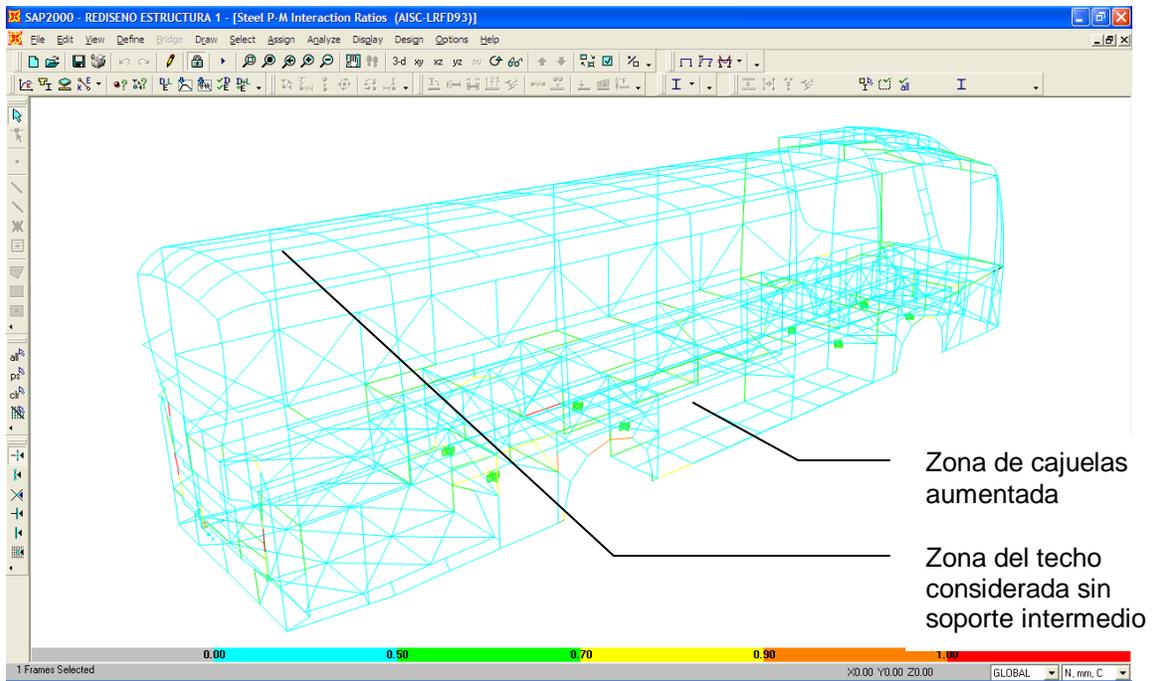


Fig. 5.7 Comprobación de diseño de la parte posterior de la estructura.

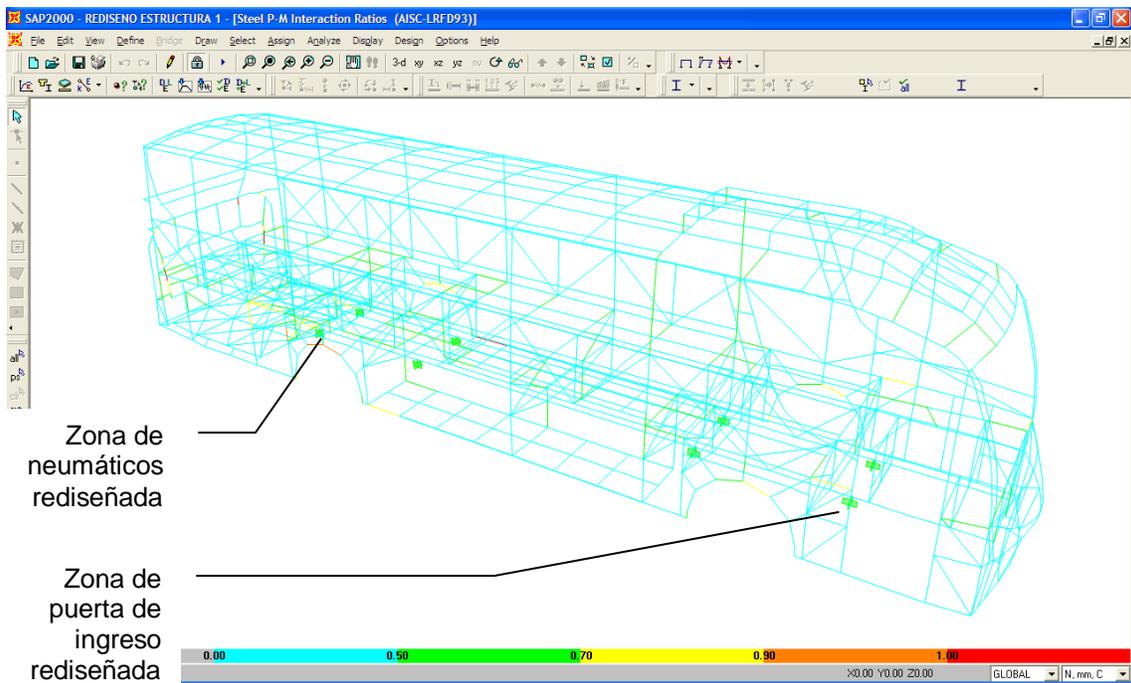


Fig. 5.8 Comprobación de diseño de la parte delantera de la estructura.

Como se comprueba en las figuras 5.7 y 5.8, la estructura diseñada presenta buena resistencia a las cargas aplicadas¹³³, siendo las zonas rediseñadas un claro ejemplo de que se puede conseguir buenas resistencias en estructuras haciendo un uso apropiado de la geometría en materiales los cuales se dispone.

5.5.2 COMPROBACIÓN DE RESISTENCIA RESPECTO A TORQUES APLICADOS.

En el apartado de resistencia al torque producido en la estructura, los datos completos del análisis del estructura diseñada puede encontrarse en el anexos correspondientes. Al comparar éstos con los torques de diseño de la Tabla 4.11 se comprueba que los elementos de la estructura rediseñada presentan una resistencia satisfactoria a los torques generados en la misma. Ningún elemento falla respecto al torque.

5.5.3 COMPROBACIÓN DE RESISTENCIA A FATIGA.

En general, los elementos de la estructura resisten satisfactoriamente a la fatiga. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los elementos del piso son los más vulnerables a los efectos de cargas fluctuantes, por lo que hay que cuidar el proceso de construcción para que los mismos tengan la capacidad suficiente de resistir las cargas cíclicas¹³⁴.

Tabla 5.1 Elementos con menor Factor de seguridad a fatiga de la estructura rediseñada de la unidad Feline de Miral.

ELEMENTO	SECCIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD
1769	T25X25X2	1.399

¹³³ Véase Capítulo 3, incisos 3.3; 3.4.7

¹³⁴ V. Anexo I

436	T50X50X3	1.114
14	T100X50X2	1.183
690	C50X25X2	1.167
672	C50X25X2	1.202

5.5.4 COMPROBACIÓN DEL PESO DE LA ESTRUCTURA.

El peso del estructura rediseñada es de 23 766.1 (N), siendo peso del estructura original de 24 725.9 (N). Se ha logrado una reducción de 959.8 (N) [96 (kg)], que constituye un 3.88% del peso original del estructura.

5.5.5 COMPROBACIÓN DE DENSIDAD DE CARGA.

Como se definió en 4.1.2, de densidad de cargas un parámetro que permite comprobar el uso eficiente de los materiales en la construcción de la estructura. A continuación se muestra el valor de la densidad de carga calculado para la estructura rediseñada:

Masa de la estructura $M_e := 2376.6$ (kg)

Longitud de la estructura $L_e := 13.1$ (m)

Densidad de carga $K_e := \frac{M_e}{L_e}$
 $K_e = 181.42$ $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}}\right)$

El valor de la densidad de carga para la estructura rediseñada presenta una mejoría del 3.1% respecto a la estructura original.

5.5.6 COMPROBACIÓN DE CARGA SOBRE LOS EJES.

A continuación se resume las cargas soportadas por los ejes con el rediseño de la estructura:

Tabla 5.1 Carga aplicada sobre los ejes del chasis de la unidad Feline con estructura rediseñada.

CONDICIÓN DE CARGA DE LA UNIDAD	CARGA EN EL EJE POSTERIOR (kg)	CARGA EN EL EJE DELANTERO (kg)
Carga admisible	10500	6700
Peso de la estructura (DEAD)	1349	1027
Carga muerta (constantes+DEAD) + Pasajeros	8027	6675

Los pesos actuantes en la estructura se han distribuido de manera más conveniente aportando al mejor funcionamiento de la unidad.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

1. En el presente proyecto se ha diseñado una metodología de modelado, simulación y análisis de la estructura de un autobús en general, partiendo de un estudio teórico global que determine la representación geométrica y matemática de una unidad, las condiciones externas reales a las cuales es sometida y estándares valederos de comparación que posibiliten establecer la resistencia de la estructura ante tales condiciones.
2. Se ha considerado 7 tipos de carga individuales actuantes sobre la estructura de una unidad en condiciones de funcionamiento, incluyendo cargas constantes necesarias para el funcionamiento de la unidad, cargas debidas a los viajeros, cargas dinámicas debidas a irregularidades de las vías, cargas de resistencia del viento, cargas de frenado y aceleración violentos y cargas de giro lento y rápido, las mismas que actúan en conjunto dependiendo de las condiciones de manejo y utilización, para lo cual se ha determinado 9 situaciones de carga que combinan apropiadamente las cargas individuales detalladas, simulando las condiciones de utilización reales de la unidad.
3. Como caso particular se ha implementado con éxito la metodología de modelado, simulación y análisis en la unidad de transporte Feline de Miral, utilizando herramientas computacionales apropiadas tanto para el modelado geométrico de la estructura completa con AutoCad 2006, como para la aplicación y simulación de las cargas y situaciones de carga sobre

la estructura en SAP2000 v.9.3, y para el análisis de resultados obtenidos, bajo parámetros de las Especificaciones de Diseño por Factor de Carga y Resistencia para Secciones Estructurales Tubulares de Acero establecidas por el Instituto Americano de la Construcción de Acero.

4. La situación de carga crítica es la situación de carga 9 (SC9), que se presenta cuando la unidad, completamente llena de pasajeros, negocia una curva de radio corto (adelantamiento) cuya superficie se encuentra en mal estado y realiza una frenada brusca.

5. Del análisis del comportamiento de la estructura de la unidad Feline se sigue que la distribución de esfuerzos sobre la misma no es uniforme, presentándose zonas en las que miembros estructurales soportan esfuerzos excesivos, tales como la zona de transición entre la cajuela posterior y el piso, donde miembros pertenecientes al piso en voladizo llegan al 90% de su capacidad de soporte de esfuerzos; las zonas de anclajes y estabilizadores cercanos a los ejes, especialmente el posterior, donde se tiene largueros transversales del piso superior con porcentajes de utilización del 70%; las zonas de estructuras laterales cercanas a las aberturas para los neumáticos y puerta de ingreso, donde miembros pertenecientes que bordean el 100% de utilización; y la zona inferior de la estructura del respaldo, donde existen miembros con porcentajes de utilización cercanos al 100%. En general se tiene que el piso de la unidad, cerca de los ejes y las zonas de las estructuras laterales alrededor de los neumáticos y de la puerta de ingreso (discontinuidades en la estructura) son las zonas que presentan la mayor cantidad de esfuerzos porque las cargas se transmiten directamente desde la suspensión; el respaldo presenta esfuerzos elevados por ser medio de unión; y la parte frontal de la unidad y el techo no presentan grandes concentraciones de esfuerzo, por lo que sus miembros son considerados de los de menor sollicitación en la estructura.

6. El análisis en detalle de la zona de transición entre la cajuela y el piso superior de la unidad y de una junta soldada compleja con la ayuda de CosmosWorks demostró la utilidad del mencionado software, siempre con la aplicación de cargas provenientes de análisis globales, como el realizado en el presente proyecto en SAP2000.
7. Se ha considerado el fenómeno de torsión que afecta los miembros estructurales, encontrándose falla en el elemento 1414 perteneciente a la estructura de respaldo de la unidad. Ningún otro elemento de la estructura presenta falla por tal fenómeno.
8. Se ha considerado también el fenómeno de fatiga que afecta los miembros estructurales debido la fluctuación de las cargas dinámicas, donde se observa que los elementos más propensos a fatiga son 3 de la estructura de respaldo con factores de seguridad entre 0.86 y 0.91; dos elementos que se encuentran en la estructura lateral derecha cerca del eje posterior de la unidad con factores de seguridad de 0.81; un elemento del piso cercano al eje posterior con 0.95 de factor de seguridad. En general, los elementos mas vulnerables a fatiga son los del piso y laterales cercanos a los ejes especialmente el posterior y los del respaldo. El resto de elementos presenta altos factores de seguridad a fatiga.
9. La estructura rediseñada presenta una distribución de esfuerzos más uniforme, con la ausencia de elementos que soportan esfuerzos mayores al 50% de su capacidad de carga; con estructuras laterales, de piso y de respaldo apropiadas para soportar cargas extremas gracias a los cambios geométricos, en las zonas de las puerta de ingreso y aperturas para los neumáticos y zonas alrededor de los ejes, y a los cambios en las propiedades realizados. Del mismo modo se ha eliminado elementos en la zona frontal y del techo de acuerdo a criterios de seguridad pero, como es el caso del techo, no se puede eliminar gran parte de elementos sub – esforzados por consideraciones constructivas.

10. Se ha reducido el tamaño de ciertos elementos de las estructuras laterales, por lo que se evidencia que las zonas más vulnerables de las mismas son las uniones con las estructuras del piso.
11. Con la reducción de un segmento de anclaje al chasis se ha logrado aumentar la capacidad de las cajuelas en un 20% de su volumen original y se ha determinado que el pódico ubicado detrás del eje delantero es el que soporta mayores esfuerzos por ubicarse en una zona donde los apoyos encuentren considerablemente separados.
12. El peso de la estructura se ha reducido en un 3.88% respecto al peso original y la distribución de carga sobre los ejes concuerda con las especificaciones del fabricante del chasis, con una mejor ponderación de cargas sobre la estructura, del mismo modo, el valor de la densidad de carga para la estructura rediseñada presenta una mejoría del 3.1% respecto a la original, factores que contribuyen al mejor desempeño en manejo, confort y seguridad de la unidad, así como evidencian a la mejor utilización de la materia prima.
13. Se ha reducido el fallo por torsión en los elementos de la estructura gracias al mejoramiento de la configuración de las estructuras laterales y piso de la misma.
14. Se ha reducido el fallo por fatiga debido a la mejor configuración de la estructura de respaldo principalmente, que, con una mejor configuración geométrica, es capaz de absorber de manera más eficiente los esfuerzos transmitidos a la misma a través de los laterales; y al refuerzo de miembros en estructuras laterales y piso.
15. La comprobación de la estructura bajo requerimientos exigidos por normas nacionales e internacionales, como se analiza en el Anexo C, permitió determinar que la resistencia de la unidad Feline de Miral es sobresaliente ante la eventualidad de un volcamiento en carretera.
16. Del análisis del Anexo A se sigue que es beneficiosa la aplicación de normas de construcción y manufactura, como las recomendadas por la Sociedad Americana

de Soldadura, porque permiten estandarizar y optimizar los procesos de soldadura, y en general, aumentar la competitividad de la empresa. Del mismo modo, las alteraciones o modificaciones hechas sin criterio técnico al bastidor del chasis pueden causar concentraciones de esfuerzo y deformaciones excesivas del material, provocando al mediano plazo combamientos o grietas en el mismo.

17. El costo del proyecto, como puede observarse en el Anexo D, asciende a USD\$ 8325, siendo el mismo ostensiblemente inferior al ofertado por empresas internacionales, de no menor de USD\$ 20000, lo cual demuestra que la capacidad de los profesionales nacionales permite competir con símiles extranjeros y debe ser explotada en beneficio del país y de de quienes lo conforman.

18. En general, dado lo analizado a través del presente proyecto, la unidad de transporte de pasajeros Feline de Miral resiste de manera satisfactoria las condiciones a las cuales fue sometida en las diversas simulaciones de resistencia estructural y vuelco gracias al correcto diseño inicial y a la contribución decisiva del análisis y del rediseño para lograr una estructura segura y confiable.

6.2 RECOMENDACIONES

1. Para una correcta representación geométrica y matemática es necesario hacer un estudio teórico del comportamiento de la unidad, disponer de planos dimensionales adecuados, conocer la utilización que se pretende dar a la misma y elegir una norma correcta de comparación de resultados.

2. Considerar las cargas que actúan de manera efectiva en la unidad de acuerdo a su utilización, sin sobrecargar la misma.

3. Actualizar permanente las herramientas computacionales y especificaciones internacionales de diseño, de acuerdo al avance de la tecnología y disponibilidad en el mercado, para asegurar confiabilidad en los resultados. Tener siempre presentes los criterios fundamentales y conceptos básicos de ingeniería al utilizar ayudas computacionales.
4. Comprobar en cada análisis la situación de carga que es crítica para determinada configuración de la estructura analizada.
5. Enfocar los medios de análisis en las zonas en las que, por criterios de ingeniería, se presentan mayores esfuerzos.
6. Utilizar cargas provenientes de análisis globales como datos para análisis detallados de elementos.
7. Dado que SAP2000 no realiza el diseño de elementos tubulares sometidos a torsión, es siempre necesaria una verificación manual de los mismos, como la efectuada en el presente proyecto.
8. Tener en cuenta la influencia de la fatiga en la reducción de resistencia de elementos a esfuerzos fluctuantes siempre que se consideren cargas dinámicas cíclicas.
9. Considerar los cambios propuestos en el Capítulo 5 para lograr uniformidad en los esfuerzos actuantes en la estructura, reforzando zonas y miembros débiles y quitando los sub-utilizados con criterios de ingeniería de construcción y costos.
10. Analizar con detalle las estructuras laterales para determinar cuales refuerzos son los mas solicitados y cuales uniones no presentan altos regimenes de sollicitación.

11. Estudiar la posibilidad de eliminación de otras zonas de anclaje, siempre y cuando no afecten la seguridad estructural de la unidad.
12. Ubicar los elementos necesarios para el funcionamiento de la unidad (tanque de combustible, compresor, etc.) de manera que el peso total se distribuya en mayor medida hacia el eje trasero.
13. Analizar mecanismos complementarios de reducción de influencia de torsión como rediseño de geometría de la estructura, juntas, etc.
14. Poner especial cuidado en la construcción de la estructura de respaldo que al considerarse como medio de unión, es de vital importancia para el correcto desempeño de la estructura y su resistencia a fatiga. Del mismo modo, tener en cuenta que los elementos del piso son los más vulnerables a los efectos de cargas fluctuantes, por lo que hay que cuidar el proceso de construcción para que los mismos tengan la capacidad suficiente de resistir las cargas cíclicas
15. Realizar pruebas físicas de comprobación de unidades ante requerimientos nacionales e internacionales por medio de prototipos.
16. Aplicar normas de construcción tanto en soldadura como en otras áreas de la construcción de buses para lograr estandarización y aplicar criterios adecuados.
17. Dar preferencia a tecnologías, métodos, criterios y procedimientos de origen ecuatoriano, debido al conocimiento del entorno que los profesionales nacionales ofrecen en comparación con el poco conocimiento del mercado por parte de extranjeros, debido al grado de preparación y capacidad de los actuales profesionales del país y debido a

que se debe tener presente que es posible superar expectativas siempre que se tenga los objetivos bien claros y la confianza bien marcada.

18. Continuar el estudio de carrocerías de unidades de transporte de pasajeros en campos como impacto, cinturones de seguridad individuales y demás, para la optimización de las mismas y la evaluación de sus condiciones de seguridad.

REFERENCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

1. NACIONES UNIDAS, COMISIÓN ECONOMICA EUROPEA, (UNECE), Reglamento Número 36.03 “Prescripciones uniformes relativas a la homologación de los vehículos de transporte de pasajeros de grandes dimensiones en lo referente a sus características generales de construcción”, Traducido del inglés, Ginebra 1986, 150 p.
2. NACIONES UNIDAS, COMISIÓN ECONOMICA EUROPEA (UNECE), Directriz TRANS/WP.29/78/Rev.1/Amend “Clasificación y definición de vehículos y trailers”, Traducido del inglés, Ginebra 1999, 12 p
3. NACIONES UNIDAS, COMISIÓN ECONOMICA EUROPEA, Reglamento Número 66 “Prescripciones uniformes relativas a la homologación de los vehículos de transporte de pasajeros de grandes dimensiones en lo referente a la resistencia mecánica de su superestructura”, Traducido del inglés, Ginebra 1986, 25 p.
4. ADAMS, H. Chassis engineering; Traducido del ingles. Primera ed.. New York, HPBooks, s.f. pp 85-94.
5. HINO MOTORS LTD., Manual para montaje de carrocerías; Decima ed. Japón 2000, 110 p.
6. VOLKSWAGEN LTD, Diretrizes de beneficiamiento Volksbus, traducido del portugués, Brasil 2001, 250 p.
7. SCANIA CV AB, Bus Builder’s Manual, traducido del inglés, Suecia 2001, 323 p.

8. McCORMAC, J. Análisis de estructuras; Segunda ed; Traducido del inglés por José de la Cera; México; Alfaomega 2002; 693 p.
9. NOVILLO, G. Análisis estructural de carrocerías para autobuses. Tesis Master Ing. Estructural. Escuela Politécnica del Chimborazo. Escuela de Postgrado – Facultad de Mecánica. 1999; 80 p.
10. CASTEJÓN, L. et al. Roll over crash simulation of a new concept of light weight bus. International Journal of Vehicle Design. Department of Transportation Engineering, University of Zaragoza, Spain, 2004. Traducido del inglés, 12 p.
11. LAN, F. Et al. Comparative analysis for bus side structures and lightweight optimization. Proc. Instrn. Mech. Engrs. Vol 218 Part D: J. Automotive Engineering, 2003. Traducido del inglés, 10 p.
12. ARROBA, C. Cálculo estructural para carrocerías bajo norma INEN. Empresa Metropolitana de Servicios y Administración del Transporte EMSAT, 2004
13. CHUDAKOV, D. A. Fundamentos de la teoría y cálculo de automóviles y tractores. Ed. Mir, Moscú, 1977.
14. SIMEON, B. A Nonlinear Truck Model and its Treatment as a Multibody System, Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 50, 523-532.
15. OTERO, L. Análisis del tren bus de pasajeros M – 2. Tesis para la obtención del grado de Doctor en ciencias técnicas. La Habana, 1995
16. AVALLONE, E. y BAUMEISTER, T. Manual Marks del Ingeniero Mecánico. Traducido del inglés por Francisco Noriega. 9ª ed. México, McGraw Hill, 2002, v. 2 pp. 11-1; 11-171
17. SHIGLEY, J. y MISCHKE, C. Diseño en ingeniería mecánica, Sexta ed; Traducido del inglés por Javier León ; México; McGraw Hill 2001; 1257 p.
18. RILEY, W. Et al. Mecánica de materiales. Primera ed; Traducido del inglés por Raúl Arriola ; México; Limusa Wiley 2001; 708 p.
19. MERCEDES BENZ, Chasis OF 1721 Especificaciones, traducido del inglés, Brasil 2004.
20. ROKACH, A. Structural Steel Design. Traducido del inglés. Primera ed. New York; McGraw Hill; 2001;192 p.

21. AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (AISC), Load and Resistance Factor Design Specification for Steel Hollow Structural Sections. Traducido del inglés. Chicago 2000, 52 p.
22. AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (AISC), Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings. Traducido del inglés. 2da ed. Chicago 1993, 481 p.
23. GHALI, A. Et al. Structural Analysis. Traducido del inglés, 4ta ed. Londres; Spon Press (UK), 1998, pp 149-161.
24. TIMOSHENKO, J y GERE, J. Resistencia de Materiales. Traducido del inglés por José de la Cerda et al. 4ta ed. Madrid, Thompson-Paraninfo, 2002; pp 116-119
25. COMPUTERS AND STRUCTURES, Inc., CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, Traducido del inglés, Berkley, Sept. 2004; 412 p.
26. BROWN, T. Mark's Calculations for Machine Design. Traducido del inglés. Primera Ed; New York; McGraw-Hill; 2005, pp. 285-289.
27. UNZUETA, Luis. Diseño, construcción y cálculo estático de chasis tubulares para coches de competición. Tesis Ing. Mec. Tecnun. Donosita, 2002. 156 p.
28. BECARIA, J. Soldadura de estructuras metálicas, Código AWS D1.1. Programa "Jóvenes especialistas". Ecuador. Kamitec, Sección estudiantil ASME ESPE. Septiembre 2005.
29. AMERICAN WELDING SOCIETY. Structural Welding Code – Steel AWS D1.1. Traducido del inglés. Miami 2002, pp. 194-201
30. KIM, H. S., et al. Dynamic Stress Analysis of a Bus Systems. Commercial Vehicle Engineering & Research Center. Hyundai Motor Company. Traducido del inglés. Korea, 2002. 10 p.
31. COSTA, Alvaro. Load determination in small buses. Traducido del inglés. University of Sao Paulo. 11 p.
32. WEN-HOU M., HUEI P. Worst-Case Vehicle Evaluation Methodology—Examples on Truck Rollover/Jackknifing and Active Yaw Control Systems. Traducido del inglés. Vehicle System Dynamics, 32 (1999), pp.389–408.
33. XUE, X. Automotive steel design manual. Fatigue design. Traducido del inglés. Abril 2000

34. CONCAVE RESEARCH CENTRE, CONCORDIA UNIVERSITY. Urban bus optimal passive suspension study. Traducido del inglés. Transportation Development Centre, Transport Canada. April 2001.
35. RASTOGI, N. Stress Analysis and Lay-Up Optimization of an All-Composite Pick-Up Truck Chassis Structure. Traducido del inglés. SAE, 2004
36. MATOLCSY, M. Technical questions of bus safety bumpers. Traducido del inglés. Scientific Society of Mech. Eng. Hungary. Paper number 05-0161.
37. NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION STANDARD. Federal Motor Vehicle Safety Standards. Standard No. 571.216 Roof Crush Resistance, U.S. Department of Transportation, 10-1-98 Edition.
38. INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACION. NTE INEN 1668:88; Vehículos automotores. Carrocerías metálicas para buses interprovinciales. Requisitos". Quito, 1988.
39. INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACION. NTE INEN 1323:85; "Vehículos a utomotores. Carrocerías metálicas. Requisitos". Quito, 1985
40. INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACION. NTE INEN 2205:99. "Vehículos automotores. Bus urbano. Requisitos". Quito, 1999
41. SISTEMA METROPOLITANO INTEGRADO DE TRANSPORTE. Especificaciones Técnicas Generales para los buses articulados del corredor central norte. Quito.
42. CROCKER, J; ZGELA, M. Intercity bus weight reduction Program phase 1. Traducido del ingles. Prepared for Transportation Development Centre Transport Canada. Montreal, Enero 2000.
43. MARTELLA, P., et al. Multibody Analysis of M3 Bus Rollover: Structural behaviour and passenger injury risk. Traducido del inglés. Politecnico di Torino. Dipartimento di Meccanica. Paper Number 288.

PUBLICACIONES NO PERIÓDICAS.

44. THILMANY, J. Digital safety. Mechanical Engineering. (Estados Unidos). 128 (2). 13-14, 2006.

INFORMACIÓN MAGNÉTICA

45. CD. Bus Builder's Manual. Scania. 2001.

46. CD. Diretrizes de beneficiamento. Volkswagen LTD. 2001.

DIRECCIONES DE INTERNET.

47. www.ictubular.es; Instituto para la construcción tubular, información y software sobre diseño de estructuras tubulares; español; febrero 2006.

48. <http://www.inderscience.com/browse/index.php?journalID=31&year=2001&vol=26&issue=2/3>; Jornal Internacional de diseño de vehículos. International Journal of Vehicle Design (IJVD); ingles, diciembre 2002.

49. http://www.fmcsa.dot.gov/rules-regulations/administration/fmcsr/fmcsrguidedetails.asp?rule_toc=777§ion_toc=777; Federal Motor Vehicle Safety Standards; Ingles, Marzo 2006.

50. <http://unece.org/trans/main/wp29/wp29regs61-80.html>; United Nations Standards, Ingles, Enero 2006.

51. <http://www.engin.umich.edu/group/ctm/examples/susp/susp.html>; Modelado de suspensión de bus usando funciones de transferencia (Modeling a Bus Suspension System using Transfer Function), Universidad de Michigan, Carnegie Mellon, Agosto 1997.

52. www.cidect.com; Comité internacional por el desarrollo de la construcción tubular; español; enero 2006.

53. www.dsd.at/data/home.htm; ECBOS: Enhanced Coach and Bus Occupant Safety; Ingles; octubre 2003.

54. www.revistaviajeros.com; Publicación sobre temas referentes al transporte; Español; enero 2006.
55. www.tc.gc.ca; Transport Canada, organismo estatal canadiense que regula el transporte; ingles; diciembre 2004.
56. <http://www.steeltubeinstitute.org/hsslit.htm>; Instituto Americano de tubería estructural de acero; ingles; Marzo 2006.
57. <http://www.conduit.com.ec/Product.html>; Conduit del Ecuador, fabricantes de la material prima utilizada; español; noviembre 2005